

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ISTRAŽIVANJE NOSIVOSTI
PRIJENOSA S PUŽNIM PAROVIMA

DOKTORSKI RAD

Dragan ŽEŽELJ

ZAGREB, 2007.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**ISTRAŽIVANJE NOSIVOSTI
PRIJENOSA S PUŽNIM PAROVIMA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Milan OPALIĆ, red. prof.

Mr. sc. Dragan ŽEŽELJ

ZAGREB, 2007.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK: 621.833.38

Ključne riječi: pužni parovi, rupičenje, trošenje, digitalna fotografija

Znanstveno područje: TEHNIČKE ZNANOSTI

Znanstveno polje: STROJARSTVO

Institucija u kojoj je rad izrađen:

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu

Mentor rada: Dr. sc. Milan OPALIĆ, red. prof.

Broj stranica: 168

Broj slika: 104

Broj tablica: 34

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 50

Datum obrane:

Povjerenstvo:

Dr. sc. Ivo ALFIREVIĆ, red. prof. – predsjednik povjerenstva

Dr. sc. Milan OPALIĆ, red. prof. – voditelj

Dr. sc. Vinko IVUŠIĆ, red. prof. – član povjerenstva

Dr. sc. Petar RAKAMARIĆ, izv. prof. – član povjerenstva

Dr. sc. Jože FLAŠKER, red. prof. Fakulteta za strojništvo, Maribor – član
povjerenstva

Institucija u kojoj je rad pohranjen:

Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Milanu Opaliću na kritičkom pristupu i pomoći koju mi je pružio tijekom istraživanja, provedbe pokusa i izrade ovoga rada.

Prof. dr. sc. Petru Rakamariću i djelatnicima Katedre za elemente strojeva i konstrukcija te djelatnicima Zavoda zahvaljujem na pomoći, pruženoj potpori i razumijevanju.

Zahvaljujem svojoj supruzi i kćerima na neizmornoj podršci. Ovo je i njihov rad.

1.	UVOD	1
1.1	Uvjeti rada zupčaničkih prijenosnika	1
1.2	Motivacija za istraživanje	4
1.3	Cilj rada	5
1.4	Hipoteza rada	5
1.5	Primijenjene metode	5
1.6	Očekivani znanstveni doprinos	6
1.7	Struktura rada	6
2.	SVOJSTVA I GEOMETRIJA PUŽNIH PAROVA	8
2.1	Izvedbe pužnih parova	9
2.2	Opis ZN puža	11
2.3	Proizvodnja puževa i pužnih kola	12
3.	OSNOVE O DODIRU	18
3.1	Dodir kod pužnih parova (TCA)	20
3.1.1	Zahvatne linije i polje zahvata	21
3.1.2	Određivanje polumjera zakrivljenosti bokova	24
3.1.2.1	Jedinični tangencijalni vektor na dodirnu liniju	24
3.1.2.2	Jedinični vektor normale boka zuba puža	26
3.1.2.3	Polumjeri zakrivljenosti u točki dodira	27
3.1.2.4	Polumjer zakrivljenosti boka zuba puža u P-presjeku	27
3.1.2.4.1	Polumjer zakrivljenosti boka zuba pužnog kola u P- presjeku	28
3.1.2.4.2	Ekvivalentni polumjer zakrivljenosti u P-presjeku	29
3.1.2.4.3	Ekvivalentni polumjer zakrivljenosti u normalnom presjeku	29
3.1.3	Brzine u polju zahvata	31
3.1.3.1	Brzina klizanja između bokova zubiju puža i pužnog kola	31
3.1.3.2	Brzina pomicanja zahvatne linije po boku zuba puža	32
3.1.3.3	Brzina pomicanja zahvatne linije po boku zuba pužnog kola	34
3.1.3.4	Sumarna brzina	34
3.2	Stupanj prekrivanja	35
3.3	Trenje	36
3.3.1	Teorije podmazivanja	37
3.3.2	Proračun gubitaka i iskoristivosti prema DIN 3996	48
3.3.2.1	Iskoristivost ozubljenja	48
4.	MATERIJALI I MAZIVA	52
4.1	Materijal puža	52
4.2	Materijal pužnog kola	52
4.3	MAZIVA	56

4.3.1	Općenito o mazivima	56
4.3.1.1	Utjecaj temperature.....	57
4.3.1.2	Utjecaj pritiska.....	61
4.3.2	Izbor maziva u istraživanju	66
5.	TROŠENJE POVRŠINA DODIRA.....	70
5.1	VRSTE OŠTEĆENJA TROŠENJEM	70
5.1.1	Adhezija	74
5.1.2	Umor materijala	80
5.1.3	Abrazija.....	89
6.	DIGITALNA FOTOGRAFIJA I FORMATI ZAPISA.....	91
6.1	Digitalna fotografija.....	91
6.2	Formati zapisa digitalne fotografije.....	93
6.3	Pretvornici i alati za obradu fotografije	95
6.4	Računalni i strojni vid.....	96
7.	GREŠKE METODE.....	99
7.1	Određivanje površine zuba	99
7.2	Prikrata površine	106
7.3	Distorzija.....	108
7.4	Određivanje površine oštećenja	109
8.	OPREMA	112
8.1	Ispitni prijenosnik	112
8.2	Ispitno postolje.....	114
8.3	Oprema za fotografiranje	116
9.	PROVEDBA POKUSA	120
9.1	Podešavanja slike nošenja.....	121
9.2	Uhodavanje	121
9.3	Fotografiranje	122
9.4	Digitalna obrada.....	123
9.4.1	Predobrada	123
9.4.2	Obrada i analiza	123
10.	REZULTATI ISTRAŽIVANJA	125
10.1	Oštećenja rupičenjem pužnog kola AlSn6.....	125
10.2	Oštećenja rupičenjem pužnog kola CuSn12	133
10.3	Rezultati praćenja iskoristivosti.....	137
11.	ZAKLJUČAK	141
12.	PRILOG: TEHNIČKI PODACI O UREĐAJIMA I OPREMI	144
13.	LITERATURA.....	146

Slika 1.1 Striebeckov dijagram.....	2
Slika 1.2 Promjena debljine uljnog filma kod para čelnika s ravnim zubima	2
Slika 2.1 Pužni par	8
Slika 2.2 Izvedbe pužnih parova obzirom na oblik puža i pužnog kola	9
Slika 2.3 Širina pužnog kola i aktivna širina boka pužnog kola.....	10
Slika 2.4 Osnovne dimenzije pužnog para.....	11
Slika 2.5 Utjecaj netočnosti izrade na postizanje slike nošenja.....	14
Slika 2.6 Greška prijenosa za jedan okret pužnog kola	15
Slika 2.7 Zahvat između zubi puža i pužnog kola s 1200 uzoraka u sekundi	16
Slika 3.1 Koordinatni sustavi u analizi zahvata pužnog para	20
Slika 3.2 Profil boka u aksijalnom presjeku (A-profil)	21
Slika 3.3 Određivanje točke T_D u skladu s osnovnim zakonom ozubljenja	21
Slika 3.4 Polje zahvata u x-y ravnini (čeona ravnina)	23
Slika 3.5 Polje zahvata u y-z ravnini (tangencijalna ravnina)	24
Slika 3.6 Jedinični vektor normale e_n boka zuba puža	26
Slika 3.7 Zakrivljenost profila u P-ravnini (P-profil)	28
Slika 3.8 Veza između polumjera zakrivljenosti ρ_1 i ρ_2	29
Slika 3.9 Veza između polumjera zakrivljenosti ρ i ρ_N	30
Slika 3.10 Ekvivalentni polumjeri zakrivljenosti u polju zahvata	31
Slika 3.11 Brzina klizanja obzirom na brzine puža i pužnog kola u točki dodira	32
Slika 3.12 Brzina P-profila u smjeru osi puža i brzina točke dodira u P-presjeku	33
Slika 3.13 Pomak zahvatne linije po boku zuba puža.....	33
Slika 3.14 Brzine u zahvatu bokova zuba puža i pužnog kola	34
Slika 3.15 Profil sumarnih brzina	34
Slika 3.16 Zahvat profila puža i pužnog kola u aksijalnom presjeku	35
Slika 3.17 Utjecaj promjene viskoziteta i elastične deformacije na raspodjelu hidrodinamičkog pritiska i debljinu mazivog filma.....	39
Slika 3.18 Utjecaj relativne brzine klizanja na promjenu debljine mazivog filma.....	40
Slika 3.19 Shematska predodžba iteracijskog TEHD modela	42
Slika 3.20 Ukupni faktor trenja u polju zahvata	42
Slika 3.21 Profil temperature uljnog filma	43
Slika 3.22 Predodžba mješovitog ili djelomičnog EHD podmazivanja.....	44
Slika 3.23 Veza između parametra λ i vijeka trajanja obzirom na oštećenja.....	44
Slika 3.24 Tekstura dodirnih površina	45
Slika 3.25 Predodžba mikro-EHD mehanizma podmazivanja	45

Slika 3.26 Predviđeni pritisci i debljine uljnih filmova kod kotrljanja (lijevo) i istovremenog sklizanja i kotrljanja (desno)	46
Slika 3.27 Predviđeni utjecaj hrapavosti na profil pritiska i visinu uljnog filma	46
Slika 3.28 Debljina uljnog filma u zahvatnom polju za glatke površine	47
Slika 3.29 Debljina uljnog filma u zahvatnom polju za hrapave površine	47
Slika 4.1 Zavisnost tvrdoće AlSn6 o temperaturi materijala	54
Slika 4.2 Usporedba faktora trenja o brzini klizanja za CuSn12 i AlSn6	55
Slika 4.3 Usporedba površine istrošenja o vremenu pogona za CuSn12 i AlSn6	55
Slika 4.4 Usporedba zavisnosti viskoziteta o temperaturi za različite vrste ulja	57
Slika 4.5 Utjecaj temperature ulja na iznos ukupnog trošenja	58
Slika 4.6 Utjecaj temperature ulja na otpornost prema zaribavanju	58
Slika 4.7 Utjecaj temperature ulja na otpornost prema mikro rupičenju	59
Slika 4.8 Utjecaj temperature ulja na broj ciklusa prije pojave rupičenja	59
Slika 4.9 Zavisnost viskoziteta o pritisku za turbinsko i transmisijsko ulje	63
Slika 4.10 Zavisnost viskoziteta o temperaturi za turbinsko i transmisijsko ulje	63
Slika 4.11 Promjena faktora trenja za različite pritiske	65
Slika 4.12 Promjena gustoće ulja s pritiskom i utjecaj na šiljak pritiska	66
Slika 4.13 Zavisnost kinematskog viskoziteta o temperaturi	67
Slika 4.14 Zavisnost o temperaturi a) dinamičkog viskoziteta i b) gustoće	68
Slika 5.1 Primjer ograničenja izlaznog momenta obzirom na oštećenja i uvjete rada,	74
Slika 5.2 Procesi trošenja kliznih elemenata	74
Slika 5.3 Veza graničnog istrošenja, čvrstoće i broja izmjena	77
Slika 5.4 Istrošenost zubi pužnog kola	80
Slika 5.5 Inicijalna površinska pukotina i podpovršinska pukotina	80
Slika 5.6 Rastrešenost površine boka (lijevo) i odvojene čestice (desno)	82
Slika 5.7 Pojava rupičenja i na ulaznoj strani zuba kod loše slike nošenja	83
Slika 5.8 Napredovanje rupičenja na ulaznoj strani zuba pužnog kola	83
Slika 5.9 Utjecaj opterećenja na povećanje rupičenjem oštećene površine	88
Slika 5.10 Čestice nastale adhezivnim trošenjem; uvećanje 50x, digitalno obrađeno	89
Slika 5.11 Abrazija boka pužnog kola nakon $4,9 \cdot 10^4$ ciklusa uslijed nepravilnosti u pogonu (lijevo prije, desno poslije)	89
Slika 5.12 Površina boka zuba pužnog kola s oštećenjima rupičenja i abrazije	90
Slika 6.1 Ilustrirani prikaz senzora s Bayer uzorkom polja foto-osjetljivih elemenata	91
Slika 6.2 Postupak nastanka digitalne fotografije uporabom mozaik senzora	92
Slika 6.3 Princip rada klasičnog filma, mozaik senzora i troslojnih senzora	92
Slika 6.4 Troslojni senzor (gore) i mozaik senzor (dolje)	93

Slika 6.5 Shematski primjer izvedbe sustava strojnog	97
Slika 6.6 Pužno kolo AlSn6 za vrijeme rada	97
Slika 6.7 Reducirani sustav strojnog vida.....	98
Slika 7.1 Shematski prikaz perioda kliznog istrošenja u jednom stupnju opterećenja	99
Slika 7.2 Određivanje približne površine projekcije boka zuba pužnog kola	100
Slika 7.3 Definiranje parcijalnih površina pomoću dimenzija pužnog para.....	101
Slika 7.4 Projekcija površine zuba iz čelone ravnine	102
Slika 7.5 Model pužnog kola od AlSn6 (lijevo), površina boka zuba pužnog kola sa skošenjem (desno gore) i bez skošenja (desno dolje)	103
Slika 7.6 Model za određivanje parcijalnih površina	104
Slika 7.7 Određivanje mjerila predmeta na temelju referentne geometrije	107
Slika 7.8 Utvrđivanje distorzije na referentnoj mreži.....	108
Slika 7.9 Distorzija mreže i utjecaj na slikanje zuba pužnog kola	108
Slika 7.10 Greška mjerenja planimetrom u zavisnosti o veličini mjerene površine.....	109
Slika 7.11 Oštećenje rupičenjem bokova pužnog kola CuSn12Ni nakon 1500 h pri opterećenju od 500 Nm.....	110
Slika 7.12 Oštećenja rupičenjem bokova pužnog kola AlSn6 nakon 350 h pri opterećenju od 150 Nm.	110
Slika 8.1 Računalni model pužnog prijenosnika korištenog u ispitivanju.....	112
Slika 8.2 Radionički crteži pužnog vijka i pužnog kola načinjenog od AlSn6 legure	114
Slika 8.3 Radionički crtež pužnog kola načinjenog od CuSn12 legure.....	114
Slika 8.4 Sustav ispitnog postolja.....	116
Slika 8.5 Nosač fotografskog aparata i sustav pozicioniranja zuba pužnog kola	118
Slika 8.6 Ispitni prijenosnik s opremom	119
Slika 8.7 Ispitni prijenosnik za vrijeme fotografiranja	119
Slika 9.1 Kontrola slike nošenja indigo pastom; prvo podešavanje bez opterećenja	121
Slika 10.1 Zub br. 6 pužnog kola AlSn6 nakon $5,02 \cdot 10^6$ izmjena.....	129
Slika 10.2 Površine oštećenja u zavisnosti od broja ciklusa za pužno kolo od AlSn6	130
Slika 10.3 Udjeli površine oštećenja za pužno kolo od AlSn6.....	130
Slika 10.4 Preklapanje površina oštećenja kola AlSn6 pretvornikom množenja	132
Slika 10.5 Zub br. 6 pužnog kola CuSn12 nakon $4,67 \cdot 10^6$ izmjena	135
Slika 10.6 Površine oštećenja u zavisnosti od broja ciklusa za kolo CuSn12	136
Slika 10.7 Udjeli površine oštećenja za pužno kolo od CuSn12	136
Slika 10.8 Preklapanje površina oštećenja kola CuSn12 pretvornikom množenja.....	137
Slika 10.9 Prosječni stupnjevi djelovanja ispitivanih prijenosnika	138
Slika 10.10 Momenti torzije, temperatura i stupanj djelovanja za $v_g=0,695$ m/s	139

Slika 10.11 Momenti torzije, temperatura i stupanj djelovanja za $v_g=1,39$ m/s	139
Slika 10.12 Momenti torzije, temperatura i stupanj djelovanja za $v_g=1,93$ m/s	139
Slika 10.13 Momenti torzije i stupanj djelovanja za kratkotrajan rad bez ulja	140

POPIS TABLICA

Tablica 2.1 Prednosti i nedostaci pužnih prijenosnika	8
Tablica 2.2 Odstupanja točnosti vrtnje u radijalnom i aksijalnom smjeru	14
Tablica 3.1 Geometrijski oblici i izmjere površina dodira	18
Tablica 3.2 Pregled osnovnih kombinacija geometrijskih tijela u dodiru glede geometrijskih oblika površina dodira iz tablice 3.1	19
Tablica 3.3 Pretpostavke na kojima se temelji klasična <i>Reynoldsova</i> teorija HD podmazivanja	37
Tablica 3.4 Pretpostavke na kojima se temelji teorija EHD podmazivanja.....	38
Tablica 3.5 Podjela mehanizama podmazivanja kod graničnog podmazivanja	43
Tablica 3.6 Parametri za izračun temeljnog faktora trenja	49
Tablica 4.1 Podaci o sastavu materijala i obradi pužnog vijka.....	52
Tablica 4.2 Svojstva nekih materijala koji se koriste za izradu pužnih kola	53
Tablica 4.3 Kombinacije materijala puž/pužno kolo u dosadašnjim istraživanjima	54
Tablica 4.4 Zavisnost vlačne čvrstoće o temperaturi.....	54
Tablica 4.5 Definicija uvjeta rada glede temperature, opterećenja i brzine klizanja.....	60
Tablica 4.6 Preporuka za sastav ulja obzirom na uvjete rada, izvadak	60
Tablica 4.7 Barus-ova (1) i Roelands-ova (2) formulacija zavisnosti viskoziteta o pritisku i temperaturi	61
Tablica 4.8 A – tlačno-viskozitetni koeficijent α (GPa^{-1}) i B – faktor graničnog smičnog naprezanja γ	62
Tablica 4.9 Reološki modeli	64
Tablica 4.10 Preporuka za izbor ulja prema viskozitetu pri 100°C	66
Tablica 4.11 Fizikalno-kemijska svojstva ulja Epol SP 150	67
Tablica 5.1 Podjela mehanizama i vrsta trošenja.....	70
Tablica 5.2 Podjela slučajeva trošenja	72
Tablica 5.3 Uzroci nastajanja i vrste oštećenja zupčanog para bez pojave loma	72
Tablica 5.4 Utjecaj pojedinih čimbenika na trošenje i oštećenja.....	73
Tablica 5.5 Granica dodirne izdržljivosti materijala pužnog kola.....	84
Tablica 5.6 Uvjeti primjene proračuna procjene radnog vijeka pužnog para obzirom na rupičenje.....	86
Tablica 7.1 Rezultati proračuna površina obzirom na kut uspona uz $\Delta r=0,05$ mm.	105

Tablica 7.2 Usporedba pojedinih rezultata i izmjerenih veličina (površine u mm ²)	105
Tablica 7.3 Površine projekcije boka zuba i faktori prikrate (površine u mm ²).....	107
Tablica 8.1 Kombinacije pužnih parova korištenih u ispitivanju	113
Tablica 10.3 Površine oštećenja bokova zuba kola AlSn6 (u mm ²).....	129
Tablica 10.4 Udio učestalosti oštećenja na odabranim zubima pužnog kola AlSn6	133
Tablica 10.5 Izlazna strana boka zuba br. 6 pužnog kola CuSn12	133
Tablica 10.6 Površine oštećenja odabranih bokova zuba CuSn12 (u mm ²)	135
Tablica 10.7 Udio učestalosti oštećenja na odabranim zubima pužnog kola CuSn12	137

a	mm	Osni razmak
b_1	mm	Duljina navoja pužnog vijka
b_2	mm	Širina pužnog kola prema DIN 3975
b_{2H}	mm	Korisna širina pužnog kola
b_{2R}	mm	Širina vijenca pužnog kola
c_α	m ² /N	Procijenjena vrijednost tlačno-viskozitetnog koeficijenta
c_K	Ws/kgK	Specifični toplinski kapacitet ulja
d_{a1}	mm	Tjemeni promjer pužnog vijka
d_{a2}	mm	Tjemeni promjer pužnog kola
d_{e2}	mm	Vanjski promjer pužnog kola
d_{f1}	mm	Podnožni promjer pužnog vijka
d_{f2}	mm	Podnožni promjer pužnog kola
d_{m1}	mm	Srednji promjer pužnog vijka
d_{m2}	mm	Srednji promjer pužnog kola
e_{nTD}	-	Jedinični vektor normale linije zahvata
e_p	-	Jedinični vektor normale na P-ravninu
e_s	-	Jedinični tangencijalni vektor na P-profil
e_t	-	Jedinični tangencijalni vektor na dodirnu liniju u točki dodira
e_t^*	-	Jedinični vektor normale u točki dodira
h	-	Bezdimenzijski faktor najmanje srednje debljine uljnog filma
h_{am1}	mm	Tjemena visina zuba pužnog vijka u aksijalnoj ravnini
h_{am2}	mm	Tjemena visina zuba pužnog kola u aksijalnoj ravnini
h_{fm2}	mm	Podnožna visina zuba pužnog kola u aksijalnoj ravnini
$h_{min\ m}$	μm	Najmanja srednja debljina uljnog filma
m_x	mm	Aksijalni modul
Δm_{lim}	mg	Granični gubitak mase
Δm_s	mg/h	Specifična brzina trošenja mase pužnog kola prema Huberu
n_1	1/s	Brzina vrtnje ulaznog vratila (brzina vrtnje pužnog vijka)
n_2	1/s	Brzina vrtnje izlaznog vratila (brzina vrtnje pužnog kola)
p_m	-	Faktor srednjeg dodirnog pritiska
p_{n1}	mm	Normalni korak pužnog vijka
p_{x1}	mm	Aksijalni korak pužnog vijka
p_{z1}	mm	Ušpon navoja pužnog vijka
q	-	Faktor promjera
r_{g2}^*	mm	Polumjer grla pužnog kola
s	-	Bezdimenzijski faktor srednjeg puta klizanja
s_{gm}	mm	Srednji put klizanja
s_{Wm}	mm	Put trošenja unutar očekivanog vijeka trajanja pužnog kola
u	-	Prijenosni omjer
v_{1n}	m/s	Brzina pomicanja linije zahvata po boku zuba pužnog vijka
v_{2n}	m/s	Brzina pomicanja linije zahvata po boku zuba pužnog kola
v_A	m/s	Brzina točke dodira u P-presjeku
v_{DL}	m/s	Relativna brzina linije zahvata
v_g	m/s	Brzina klizanja na srednjem promjeru pužnog vijka
v_K	m/s	Brzina klizanja
v_{kol}	m/s	Brzina točke boka zuba pužnog kola
v_P	m/s	Brzina P-profila u aksijalnom smjeru

$v_{puž}$	m/s	Brzina točke boka zuba pužnog vijka
v_{ref}	m/s	Referentna brzina klizanja na srednjem promjeru pužnog vijka
v_{sum}	m/s	Sumarna brzina
z_1	-	Broj zavojnica pužnog vijka
z_2	-	Broj zuba pužnog kola
x_1, x_2	-	Pomak profila na pužnom vijku i pužnom kolu
A_{1z2}^*	mm ²	Približna površina projekcije boka zuba pužnog kola
A_{1z2}	mm ²	Približna površina boka zuba pužnog kola
A_{fl}	mm ²	Ukupna površina boka zuba pužnog kola
A_R	m ²	Proračunska rashladna površina pužnog kola
A_{sr}	mm ²	Srednja vrijednost površine oštećenja rupičenjem
E, E_{red}	N/mm ²	Modul elastičnosti i ekvivalentni modul elastičnosti
F	-	Bezdimenzijski faktor opterećenja
G	-	Bezdimenzijski faktor materijala
H	-	Bezdimenzijski faktor debljine uljnog filma
J_{0III}	-	Intenzitet trošenja rupičenjem u periodu normalnog trošenja
J_{OT}, J_{OI}	-	Referentni intenziteti kliznog trošenja i rupičenja
J_W, J_{WP}	-	Intenziteti kliznog trošenja i rupičenja
K_{LW}	-	Faktor maziva
K_W	-	Faktor debljine uljnog filma
K_{WW}, Y_W	-	Faktor materijala
L_W, N_L, N_p	-	Broj izmjena opterećenja pužnog kola
$N_{L(I+II)}$	-	Kontrolna veličina broja izmjena opterećenja pužnog kola
N_{LI}, N_{p0}	-	Broj izmjena opterećenja prije pojave rupičenja
N_{LII}, N_{LIII}	-	Broj izmjena opterećenja pužnog kola u pojedinim periodima rada
P	-	Bezdimenzijski faktor pritiska
$P_{p\ lim}$	-	Granični udio površine boka zuba pužnog kola oštećene rupičenjem
P_p	-	Udio površine boka zuba pužnog kola oštećene rupičenjem
P_{V0}	W	Gubitak praznog hoda
P_{VD}	W	Gubitak brtvljenja
P_{VLP}	W	Gubitak uležištenja
P_{Vz1-2}	W	Gubitak ozubljenja
R	mm	Polumjer zakrivljenosti
R_a	μm	Srednje aritmetičko odstupanje profila
$S_{H\ min}$	-	Najmanji faktor sigurnosti obzirom na rupičenje
S_H	-	Sigurnost obzirom na pojavu rupičenja
$S_{W\ lim}$	-	Granični faktor sigurnosti obzirom na klizno trošenje
$S_{W\ min}$	-	Najmanji faktor sigurnosti obzirom na klizno trošenje
T, T_0	°C	Temperatura i temperatura okoline
T_1	Nm	Zakretni moment na ulaznom vratilu
T_2	Nm	Zakretni moment na izlaznom vratilu
U	-	Bezdimenzijski faktor brzine klizanja
W_H	-	Faktor pritiska
W_{ML}	-	Faktor kombinacije materijal-mazivo
W_{NS}	-	Faktor intermitencije
W_p	-	Faktor oštećenja pužnog kola rupičenjem
W_S	-	Faktor strukture ulja
X	-	Bezdimenzijska koordinata
Y_G	-	Faktor geometrije

Z, S_0	-	Konstante u Roelandsovom modelu za dinamički viskozitet
Z_h, Z_N	-	Faktor trajnosti pogona
Z_{oil}	-	Faktor ulja
Z_{RW}, Y_R	-	Faktor hrapavosti
Z_s, Y_s	-	Faktor veličine
Z_u	-	Faktor prijenosnog omjera
Z_v, Z_{vW}	-	Faktor brzine
α	m^2/N	Tlačno-viskozitetni koeficijent
α_0	°	Kut nagiba boka pužnog vijka u aksijalnom presjeku
α_L	W/m^2K	Koeficijent prijelaza topline
α_n	°	Kut zahvatne crte u normalnoj ravnini
α_T	°	Kut tangente profila u promatranjoj točki
$\delta_{W \lim n}$	mm	Granično istrošenje boka u normalnoj ravnini
δ_{Wn}	mm	Očekivano istrošenje boka u normalnoj ravnini
ε_m	-	Srednji stupanj prekrivanja
γ	-	Faktor graničnog smičnog naprezanja
γ_{m1}	°	Srednji kut uspona pužnog vijka
η_0	Ns/m^2	Prosječni viskozitet maziva kod atmosferskog pritiska
η_{0M}	Ns/m^2	Dinamički viskozitet maziva kod temperature pužnog kola
η_{z1-2}	-	Stupanj korisnog djelovanja ili iskoristivost ozubljenja
λ	-	Omjer debljine uljnog filma i srednjih kvadratnih odstupanja profila
μ_{0T}	-	Temeljna vrijednost faktora trenja
μ_{zm}	-	Srednja vrijednost faktora trenja
ν	-	Poissonov broj
ν, ν_θ	mm^2/s	Kinematski viskozitet
θ_M, θ_S	°C	Temperatura pužnog kola i temperatura ulja u prijenosniku
ρ	mm	Ekvivalentni polumjer zakrivljenosti u P-ravnini
ρ_1	mm	Polumjer zakrivljenosti boka zuba pužnog vijka u P-ravnini
ρ_2	mm	Polumjer zakrivljenosti boka zuba pužnog kola u P-ravnini
ρ_M, ρ_{15}	kg/m^3	Gustoća ulja kod temperature pužnog kola i pri 15°C
ρ_N	mm	Ekvivalentni polumjer zakrivljenosti u normalnoj ravnini
ρ_{rad}	mg/mm^3	Gustoća materijala pužnog kola
$\sigma_{H \lim}$	N/mm^2	Dodirna izdržljivost materijala pužnog kola
σ_{HG}	N/mm^2	Granični dodirni pritisak obzirom na rupičenje
σ_{Hm}	N/mm^2	Srednji dodirni pritisak
$\sigma_{W \lim}$	N/mm^2	Osnovna značajka čvrstoće bokova obzirom na klizno trošenje
σ_{WP}	N/mm^2	Dopušteni pritisak na bokovima obzirom na klizno trošenje
τ_0	N/mm^2	Granično smično naprezanje pri atmosferskom pritisku
τ_E, τ_L	N/mm^2	Granično smično naprezanje u mazivom filmu
ω_1	rad/s	Kutna brzina pužnog vijka
ω_2	rad/s	Kutna brzina pužnog kola

PREDGOVOR

Pužni su prijenosnici česti strojni elementi u modernim sustavima. Poznavajući njihova pozitivna svojstva lako je razumjeti nastojanje da se umanje ili dokinu ona negativna. U tom je smislu ovaj rad usmjeren prema boljem razumijevanju procesa koji se odvijaju u radu pužnog para, a poglavito promjene udjela površine bokova oštećenih rupičenjem, jednim od prevladavajućih vrsta trošenja kod pužnih prijenosnika

Ovaj je rad izrađen u sklopu projekta "Istraživanje temeljnih elemenata strojarских sustava (0120-009)", financiranog od strane Ministarstva znanosti i tehnologije Republike Hrvatske, s ciljem povećanja nosivosti i smanjenja troškova izrade i eksploatacije, povećanja uporabnog vijeka, određivanja granica nosivosti te temeljnih spoznaja o klizno-valjnim kontaktima temeljnih strojnih sklopova i elemenata.

U radu je istraživana utjecaj točnosti mjerenja površina oštećenja rupičenjem bokova zuba pužnih kola na kvantificiranje zakonitosti promjene tog oblika trošenja u zavisnosti o iznosu i broju ciklusa izmjena opterećenja. Budući da se analiza procesa trošenja rupičenjem eksperimentalno temelji na određivanju površina oštećenja greške mjerenja imaju direktan utjecaj na valjanost iskazanih zakonitosti trošenja. Pokazano je da mjerne metode korištene u referentnim radovima iz ovog područja mogu uzrokovati značajna i nepredvidiva odstupanja rezultata mjerenja.

U eksperimentalnom dijelu rada s prijenosnikom praćen je razvoj rupičenja kod pužnih parova 16MnCr5/AlSn6 i 16MnCr5/CuSn12 do $5 \cdot 10^6$ promjena opterećenja. Vizualna razlika između oštećenja rupičenjem i ostalih površina bokova zubi pužnih kola korištena je kao glavni kriterij za izolaciju i kvantificiranje površina oštećenja. Razvijena je metodologija uzimanja i obrade digitalne fotografije koja se temelji na koncepciji strojnog vida. Prikazani su pojedini utjecaji na točnost mjerenja te je predložen analitički model za određivanje površine boka zuba pužnog kola za slučaj kada je $b_{2H}/b_{2R} < 1$. Ocjena valjanosti modela je provedena usporedbom s 3D računalnim modelom.

Analize rezultata ukazuju da je interakcija između trošenja i rupičenja glavni uzrok neravnomjerne promjene udjela površine oštećenja rupičenjem s porastom broja promjena opterećenja. Obzirom na utjecaj navedenih oblika oštećenja ispitivani je prijenosnik svrstan u grupu prijenosnika manjih osnih razmaka. Provedena je usporedba udjela i položaja oštećenja na pojedinim zubima pužnih kola kako bi se utvrdio možebitni pravilan uzorak razvoja.

Iskazane su zakonitosti promjene površine oštećene rupičenjem u zavisnosti o opterećenju i broju promjena. Također su dati su podaci o iskoristivosti za male udjele oštećenja rupičenjem i različite brzine klizanja.

Ključne riječi:

pužni parovi, rupičenje, trošenje, digitalna fotografija

This work deals with the influence of measurement accuracy of pitting areas on worm wheels on the formulation of empirical correlation between pitting, load and the number of load cycles. Since the analysis of pitting by means of an experiment is based on the determination of damaged areas, measurement errors have direct influence on the validity of such correlations. It is shown that measurement methods used in referent works concerning pitting of worm gears could result in significant and unpredictable variations of measurement results.

The experimental part of the work included the monitoring of pitting formation on worm wheels made of AlSn6 and CuSn12 subjected to loads for $5 \cdot 10^6$ cycles. In both cases the worm gear was made of 16MnCr5. A visual difference between the areas affected by pitting and the rest of teeth surfaces has been taken as a criterion for the isolation of damaged areas. Based on the concept of machine vision, a methodology for acquiring and processing digital photographs has been defined in order to automate the procedure. Effects of the method on the measurement accuracy have been discussed as well. An analytical model for the determination of approximate tooth area is proposed for worm wheels having a ratio of $b_{2H}/b_{2R} < 1$. The testing of model validity is conducted by a comparison against a 3D CAD model.

Analyses of results indicate that the interaction between the sliding wear and pitting is a primary cause of non-uniform changes of areas damaged by pitting when the number of cycles is increased. The investigated case is classified according to this result and the ratio of the influence of sliding wear and pitting into a group of transmissions with smaller axis distances. A comparison between the extent and location of pitting damages among teeth has been conducted in order to identify a possible regular pattern.

Analytical formulation of the extent of areas damaged by pitting depending on the load and the number of load cycles has been given together with the efficiency data for small extents of damaged areas and different sliding speeds.

Keywords:

Worm gears, pitting, wear, digital image

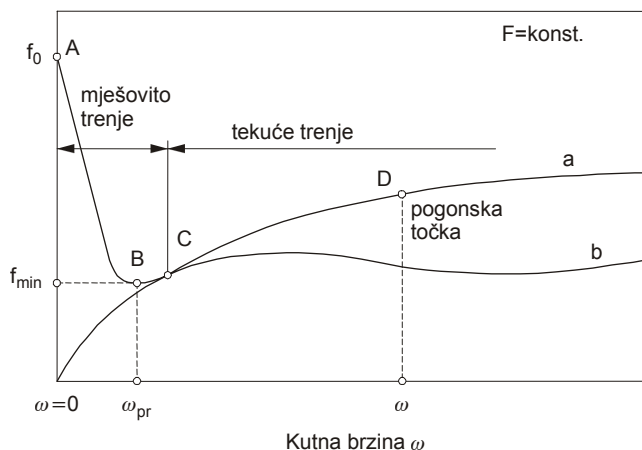
Potreba za prijenosom većih snaga, proizašla iz razvoja industrije i tehnologije uopće, poticala je istraživanja i doprinijela prirastu znanja o uvjetima u kojima rade elementi s neposrednim dodirom. Zupčanci su specifični predstavnici strojnih elemenata poradi složene geometrije, namjene¹ te uvjeta rada koji iz istih proizlaze. Specijalizacija u području zupčanika dovela je do razvoja iskustvenih i analitičkih modela, u početku vezanih uz određivanje geometrije, zahvata i tehnologije izrade. U novije vrijeme, uz unaprjeđivanje postojećih, razvijani su i modeli za proračun nosivosti i vijeka trajanja. Napredak u području maziva i teorija podmazivanja općenito te primjene različitih vrsta materijala u proizvodnji zupčanika također doprinose novim saznanjima o uvjetima rada zupčaničkih prijenosnika. Napose, nastale su i nove grane znanosti² temeljene upravo na izučavanju posrednog i neposrednog dodira i njima induciranih pojava. Napredak u području mjeriteljske i računalne tehnike kao i tehnologije općenito podržao je točnije praćenje predmetnih pojava, afirmaciju složenijih analitičkih modela te otvorio put stvaranju novih metoda i pristupa.

1.1 Uvjeti rada zupčaničkih prijenosnika

Podmazivanje je među najvažnijim čimbenicima za rad strojnih elemenata s neposrednim dodirom. Cilj kvalitetnog podmazivanja je višeznačan: mazivim se medijem razdvajaju površine u kontaktu te utječe na faktor trenja i intenzitet pojedinih vrsta trošenja, odvodi toplina itd.. Stribeck-ovom krivuljom (slika 1.1) prikazana je zavisnost faktora trenja o kutnoj brzini te pojedini režimi trenja uvjetovani udaljenošću površina u kontaktu. Postizanju potpunog razdvajanja površina prethodi prolazak kroz područja graničnog i mješovitog trenja što odgovara višim vrijednostima koeficijenata trenja.

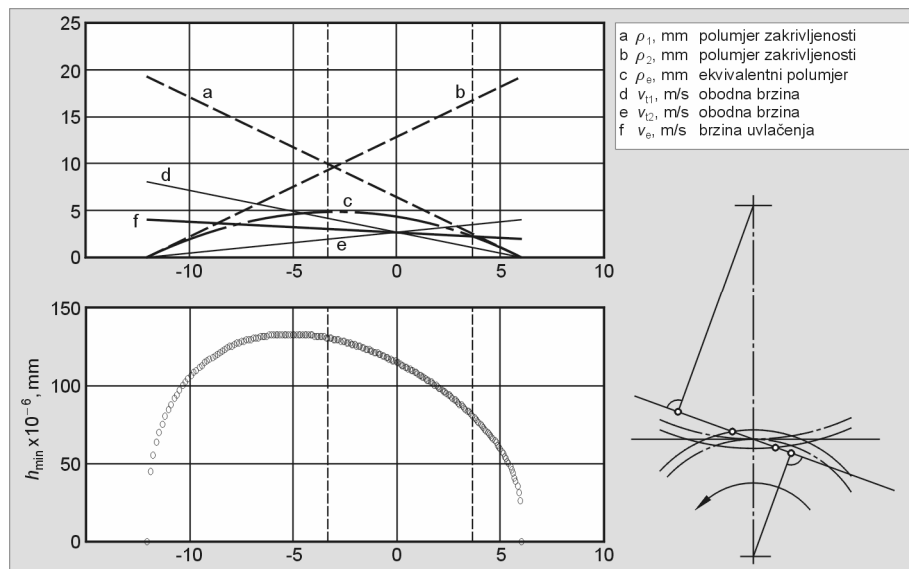
¹ Zupčanci se koriste kao elementi za prijenos snage i/ili gibanja. Potonji se koriste u nisko opterećenim pogonima gdje prevladavajući utjecaj imaju geometrija i kinematika te točnost izrade, a nosivost je načelno zanemariva. Predmet istraživanja u ovom radu su visoko opterećeni zupčanci, poglavito pužni parovi

² Tribologija, znanost i tehnika o površinama u dodiru i relativnom gibanju i o pratećim aktivnostima, prvi je puta službeno navedena pod tim nazivom u Jost-ovom izvješću 1966.g.



Slika 1.1 Stribeckov dijagram

Upravo s tog stajališta mogu se uvjeti u kojima rade zupčanički parovi ocijeniti nepovoljnima, a razlikuju se zavisno od tipa i izvedbe. Zajednički je nazivnik zupčaničkih parova da zubi kontinuirano ulaze i izlaze iz zahvata pa se i eventualno uspostavljeno hidrodinamičko podmazivanje opetovano uspostavlja i prekida. Nadalje, u općem slučaju, u zahvat ne ulaze uvijek isti parovi zubi. Kako se geometrijske značajke zuba međusobno razlikuju uslijed grešaka u proizvodnji, tako se i uvjeti mijenjaju za svaki pojedini zahvat te poprimaju statistički karakter. U cilju izrade boljeg opisa realnog dodira postojećim su proračunima pojedine greške i uvjeti obuhvaćeni odgovarajućim faktorima i koeficijentima za razne vrste zupčaničkih parova (npr. faktor utjecaja veličine, faktor raspodjele opterećenja, koeficijent ovisan o sparivanju materijala, itd.).



Slika 1.2 Promjena debljine uljnog filma kod para čelnika s ravnim zubima (uspravne crtkane linije označavaju početak i kraj zahvata)

Kod cilindričnih zupčanika s ravnim zubima promjena brzine klizanja (slika 1.2) može se razmatrati kao ravninski problem uz pretpostavku jednolikosti profila u smjeru boka

zuba (teoretski dodir po crti). Smjer brzine klizanja je okomit na crtu kontakta od početka do kraja zahvata. Također se kod ovih kontakata manifestira i klizno-valjno gibanje, a udio pojedinih komponenata obodnih brzina je promjenjiv od početnih do krajnjih točaka zahvata.

Geometrija i kinematika zupčaničkog para s pužnim vijkom i pužnim kolom uvjetuje značajno drugačije uvjete rada od navedenih za cilindrične zupčanike s ravnim zubima [1]. U kontaktu dominira udio kliznog gibanja što, s jedne strane, rezultira iznimno tihim i mirnim radom, a s druge uobičajeno visokim faktorom trenja. Kod pužnih je prijenosnika brzina klizanja uvjetovana dodirom dvije zakrivljene prostorne površine od kojih jedna (pužno kolo) ostvaraje rotacijsko, a druga (pužni vijak) rotacijsko i translacijsko gibanje. Vektor sumarne brzine kontinuirano mijenja kut od ulazne do izlazne strane boka pužnog kola pa se kontinuirano mijenjaju uvjeti za ostvarivanje hidrodinamičkog podmazivanja. Obzirom na uvjete podmazivanja i pripadni faktor trenja za pužne su prijenosnike kritični toplinska ravnoteža i procesi trošenja [2].

Kako se smatra, pužnim se prijenosom prvi bavio Arhimed (3. stoljeće p.n.e.) [1]. Prve teoretske osnove, na području geometrije, kinematike i tehnologije proizvodnje, dali su krajem 19. i početkom 20. stoljeća R. Striebeck i A. Ernst. Na području nosivosti je prve opširnije proračune proveo G. Niemann primjenjujući teorije valjnih (Striebeck) i kontaktnih (Hertz) pritisaka te na temelju velikog broja pokusa. 1942. g. G. Niemann i C. Weber primijenili su hidrodinamičku teoriju podmazivanja u proračunu konkavnog boka pužnog vijka [1]. Premda se pokazalo da konkavni oblik boka nudi mogućnosti veće opteretivosti i nižih gubitaka razlog što iz uporabe nije istisnuo ostale tipove leži prvenstveno u cijeni izrade. Iz istog razloga čak i danas pojedini proizvođači proklamiraju pužne prijenosnike jednostavnijeg oblika boka i tijela pužnog vijka. Kao alternativa skupim izvedbama konkavnog boka puno se pažnje u posljednjih 25 godina posvećuje upravo iznalaženju geometrije boka kojom će se polučiti povoljniji uvjeti zahvata, a time i uvjeti podmazivanja.

S druge strane, materijali za izradu pužnih vijaka i kola nisu doživjeli značajnije promjene. Naime, kako u radu pužnog para prevladavajući utjecaj ima klizno gibanje, zahtjevi sparivanja materijala slični su onima za klizne ležajeve. U tom smislu, materijal pužnog vijka odgovara materijalu rukavca i predstavlja „tvrdu“ komponentu, dok materijal blazinice odgovara materijalu pužnog kola i predstavlja „mekanu“ komponentu. Izučavanje postojećih i pokušaj uvođenja novih materijala za izradu pužnih kola česta je tema radova iz druge polovine 20. stoljeća [1, 2, 3].

Obzirom na uobičajene kombinacije materijala te prethodno navedene uvjete podmazivanja upravo će pužno kolo biti predmet istraživanja glede nosivosti i oštećenja. Dva se prevladavajuća oblika trošenja javljaju kod pužnih kola: klizno trošenje i rupičenje. Klizno se trošenje [2, 4] za jedan iznos opterećenja i brzinu vrtnje može podijeliti na dva,

odnosno tri perioda: period prilagodbe, prijelazni period i pogonski period. Rupičenje također možemo podijeliti u tri perioda: period inicijalnog rupičenja, normalnog i propagirajućeg. Veza između rupičenja i kliznog trošenja očituje se u odnosu brzina trošenja. Ako je brzina nastanka rupica manja od brzine kliznog trošenja u smjeru normale na površinu boka pužnog kola udio površine oštećene rupičenjem može se u nekom periodu rada smanjiti ili potpuno iščeznuti. Kod propagirajućeg rupičenja brzina kliznog trošenja je manja od brzine prirasta površine boka oštećene rupičenjem. Ipak, za razliku od čelnika kod kojih pojava rupičenja upravo najavljuje gubitak funkcije, poznato je da pužni prijenosnici mogu raditi s udjelom površine oštećene rupičenjem i preko 40% od ukupne površine boka zuba uz relativno mali ili bez pada stupnja iskoristivosti. Do danas nema konkretne teorije koja bi opisivala ovakav način rada pužnih prijenosnika.

1.2 Motivacija za istraživanje

Pužni su prijenosnici česti strojni elementi u modernim sustavima. Poznavajući njihova pozitivna svojstva lako je razumjeti nastojanje da se umanje ili dokinu ona negativna. Poradi uvjeta rada izbor materijala za izradu pužnih kola razmjerno je ograničen, ali imajući u vidu razne izvedbe parova i oblike bokova te ostale značajke koje figuriraju u radu broj kombinacija postaje prevelik za praktičnu provedbu pokusa. Dosadašnjim su istraživanjima uzimane u razmatranje razne kombinacije značajki, sve u cilju točnijeg utvrđivanja zakonitosti procesa koji se odvijaju od početka do kraja životnog vijeka prijenosnika. Razvojem tehnologije otvorio se prostor za detaljnija ispitivanja, kako za primjenu složenijih analitičkih modela, tako i za točnija mjerenja u eksperimentima. Zahvaljujući mogućnostima modernih računala u teoretskom se dijelu može simulirati rad pužnog para usporednim variranjem odabranog broja veličina, odnosno određenih kombinacija veličina. Uspješnost modela između ostalog zavisi o broju značajki koje obuhvaća, a budući da pužne parove karakteriziraju složena geometrija i uvjeti zahvata, osjetljivost na greške u proizvodnji te u pravilu veća oslobođena toplina može se očekivati da će složenost modela stalno rasti. Kao i u području računalne tehnologije oprema i uređaji za praćenja pojava tijekom istraživanja također su unaprijeđeni pa je moguće točnije odrediti pojedine veličine. Obzirom na opseg i način praćenja već provedenih istraživanja točniji rezultati mogli bi unaprijediti saznanja o pojedinim pojavama karakterističnim za rad pužnih parova.

1.3 Cilj rada

Cilj ovoga rada je utvrditi dinamiku i karakter promjena na bokovima zuba pužnog kola, poglavito promjenu udjela površine bokova oštećenih rupičenjem, jednim od prevladavajućih vrsta trošenja kod pužnih prijenosnika. U širem smislu je cilj rada detaljnije sagledati procese trošenja pužnih parova te dati praktične osnove za daljnja istraživanja.

1.4 Hipoteza rada

Motivacija za rad i ciljevi istraživanja su izraženi hipotezom:

Moguće je kvantitativno točnije utvrditi zakonitosti procesa trošenja pužnih parova uporabom tehnološki naprednijih mjernih metoda.

Hipoteza rada se temelji na postojećim saznanjima o radu pužnih parova te dostupnim podacima dosadašnjih istraživanja. Može se utvrditi da je većina istraživanja usmjerena prema dva cilja:

- Spoznaji procesa koji se odvijaju u radu pružnog para.
- Iznalaženju geometrije zupčanika koja bi omogućila bolje uvjete zahvata.

Drugi cilj je istovremeno dio i nadgradnja prvoga, jer nije moguće kvalitetno razmatrati i unaprijediti geometrijske karakteristike pužnog para bez poznavanja procesa tijekom dodira, kao što nije moguće spoznati procese bez poznavanja geometrije i njome induciranih uvjeta. Za cjelovito izučavanje bilo kojeg od navedenih ciljeva potreban je multidisciplinarni pristup budući da obuhvaćaju velik broj znanstvenih područja i disciplina, u teoretskom i praktičnom smislu. Iz navedene hipoteze proizlaze sljedeća pitanja:

- Na koji način točnost mjerenja utječe na kvantificiranje zakonitosti procesa trošenja?
- Koji oblici trošenja imaju prevladavajući utjecaj na rezultate mjerenja?
- Utječe li interakcija između prevladavajućih oblika trošenja na rezultate mjerenja i na koji način?

Odgovori na navedena pitanja bi trebali upotpuniti znanja vezana uz rad pužnih parova.

1.5 Primijenjene metode

Praktična provedba istraživanja se temelji na izradi digitalnih fotografija definirane razlučivosti učestalošću vezanom uz režim rada prijenosnika te kombinaciju materijala puž/pužno kolo. Za tu namjenu definirani su zahtjevi vezani uz prilagodbu postojeće kao i konstrukciju nove opreme, oblik zapisa te način obrade fotografija. Obrada fotografija i analiza podataka se provodi uporabom odgovarajućih računalnih grafičkih programskih

paketa te utvrđuje veličina površine oštećene rupičenjem. Formulacija zavisnosti pojedinih veličina se provodi numeričkom metodom nad dobivenim podacima. Tijekom trajanja eksperimentalnog dijela istraživanja kontinuirano se mjeri i stupanj iskoristivosti prijenosnika, posredno, preko odnosa zakretnih momenta na ulaznom i izlaznom vratilu prijenosnika. Svi se prikupljeni podaci pohranjuju u digitalnom obliku s odgovarajućom nomenklaturom. Obzirom da je rupičenje vrsta trošenja direktno uvjetovana dinamičkom izdržljivošću materijala pužnog kola očekivano je trajanje ispitivanja u rasponu od 10^5 do 10^7 izmjena. Vrednovanje metode se provodi usporedbom s rezultatima drugih autora te temeljem dosadašnjih saznanja iz područja zupčaničkih prijenosa s pužnim parovima.

1.6 Očekivani znanstveni doprinos

Ovaj je rad usmjeren prema boljem razumijevanju procesa koji se odvijaju u radu pužnog para. Analiza obrađenih digitalnih fotografija i sinteza s podacima prikupljenim tijekom praktičnog dijela istraživanja treba poslužiti kao osnova za:

- točnije iskazivanje površine bokova pužnog kola oštećene rupičenjem,
- saznanje o tijeku procesa razaranja površine te možebitnom utjecaju rupičenja na stupanj iskoristivosti prijenosnika za različite omjere površine oštećenja i ukupne površine boka
- postavljanje zakonitosti vezanih uz nastanak i širenje oštećenja rupičenjem

1.7 Struktura rada

Rad je tematski podijeljen u tri cjeline raspoređene u trinaest poglavlja. U prvoj se cjelini razmatraju teoretske osnove rada pužnih prijenosnika vezane uz geometriju i dodir, materijale i maziva te prevladavajuća oštećenja. Druga se cjelina odnosi na opis metode istraživanja i predviđene opreme, dok su u trećoj razmatraju dobiveni rezultati i daje konačan zaključak.

Prvim poglavljem se uvodi u problematiku pužnih prijenosa kako bi se ukazalo na motivaciju autora za istraživanje u tom području. Navedeni su ciljevi i metodologija, hipoteza rada kao i očekivani doprinos.

U drugom poglavljju su opisana svojstva pužnih parova, prednosti i nedostaci kao i kratak pregled vezan uz proizvodnju pužnih vijaka i pužnih kola. Dodatno je prikazan utjecaj točnosti vrtnje u radijalnom i aksijalnom smjeru na postizanje slike nošenja, odnosno pojavu i intenzitet oštećenja.

U trećem poglavljju je provedena teoretska analiza dodira pužnog para za ZN oblik boka zuba. Prikazane su značajke vezane uz kinematiku dodira kako bi se naglasili nepovoljni uvjeti za ostvarivanje uspješnog podmazivanja. U nastavku je iznesen i kratak pregled teorija podmazivanja te primjena na pužne parove.

U četvrtom poglavlju su prikazana svojstva materijala koji se uobičajeno koriste za izradu pužnih kola te pregled usporednih rezultata za materijale pužnih kola koja se koriste u istraživanju u okviru ovog rada. Dalje se razmatraju svojstva mazivih ulja i njihov utjecaj na podmazivanje općenito.

Petim poglavljem su obuhvaćeni mehanizmi trošenja s naglaskom na prevladavajuće u radu pužnih parova. Podrobnije su obrađena uobičajena oštećenja kao i preporuke proračuna.

Šesto poglavlje se odnosi na kratki prikaz digitalne fotografije, analizu strukture i oblika zapisa te raspoložive pretvornike za obradu. Na temelju pretpostavki o uvjetima fotografiranja te potrebama daljnje obrade provodi se odabir najprikladnijeg oblik zapisa. Također se teoretski definira sustav na kojem se temelji praktična provedba mjerenja.

U sedmom poglavlju su analizirane greške metode primijenjene u istraživanju. Provedena je analiza određivanja približne površine boka zuba pužnog kola te se ukazuje na možebitne greške u postojećem modelu. Određen je faktor prikrate projekcije te analiziran utjecaj distorzije na određivanje stvarne površine boka.

U osmom poglavlju su opisani laboratorijska oprema za provedbu pokusa, prijenosnik i kombinacije pužnih parova. Opisan je i način rada ispitnog postolja te dodatna oprema konstruirana za potrebe istraživanja.

Devetim poglavljem su obuhvaćeni postupci u provedbi pokusa koji obuhvaćaju uhadavanje i rad pužnog prijenosnika, mjerenje i fotografiranje te obradu prikupljenih fotografija i podataka.

U desetom i jedanaestom poglavlju prikazani su obrađeni rezultati s osvrtom na rezultate drugih autora i dosadašnja istraživanja, postavljen je zaključak te određeni mogući smjerovi za daljnja istraživanja.

Dvanaesto poglavlje sadrži tehničke podatke o opremi korištenoj tijekom izvođenja pokusa, a posljednje popis referentne literature.

Svojstva i geometrija pužnih parova

Pužni se zupčanički par sastoji iz puža i pužnog kola (slika 2.1). Puž može biti izveden zajedno s vratilom ili kao zaseban dio. Pužna se kola iz ekonomskih razloga često izrađuju navlačenjem vijenca na glavinu, a naročito kada je riječ o većim dimenzijama i vijencima od obojenih metala.



Slika 2.1 Pužni par

Pužni parovi, poradi već prije navedenih uvjeta rada, imaju određene prednosti i nedostatke obzirom na druge vrste zupčanika [5] (tablica 2.1).

Tablica 2.1 Prednosti i nedostaci pužnih prijenosnika

Prednosti
Mogućnost ostvarivanja visokih prijenosnih omjera ($i \leq 100$) s jednim parom prijenosnih elemenata. Spajanjem više prijenosnika postižu se vrlo visoki prijenosni omjeri
Tihi rad kod visoke i niske brzine vrtnje kao rezultat pretežito kliznog gibanja.
Visoka opteretivost i dugačak vijek trajanja uz uvjet točne izrade, pravilne montaže, pravilnog izbora materijala puža i pužnog kola, dobrog ležištenja i podmazivanja.
Relativno dobra iskoristivost kod viševojnih puževa uz ispunjavanje određenih uvjeta.

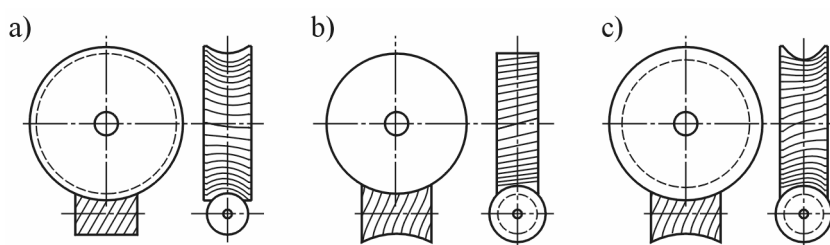
Prednosti
Mogućnost samokočnosti prijenosnika uz $\eta < 50\%$.
Obzirom na cilindrične zupčanike i stožnike, za prijenos iste snage obično su lakši, a kod većih prijenosnih omjera i jeftiniji. Obzirom na hipoidne zupčanike imaju veću dužinu dodira bokova i mirniji rad, a obzirom na zupčanike s zavojskim zubima veću opteretivost i višu iskoristivost.
Puževi određenih veličina se mogu koristiti u paru s većim brojem različitih pužnih kola te ostvarivati različite prijenosne omjere.
Nedostaci
Iskoristivost pužnih prijenosnika, posebice s cilindričnim pužem, je manja od iskoristivosti prijenosnika s cilindričnim zubima ili stožnicima.
Kod prijenosnika niske iskoristivosti razvija se veća količina topline koju je potrebno odvoditi umjetnim hlađenjem.
Kod velikih prijenosnih omjera, malog kuta uspona, malih brzina klizanja i/ili malih dimenzija, iskoristivost pada moguće i ispod 50%.

Pojedine navedene karakteristike, naizgled kontradiktorne, moguće je postići samo uz ispunjavanje određenih uvjeta. Samo dobro poznavanje problematike vezane uz područje pužnih prijenosnika daje uvid u složenost tih uvjeta i ograničenja od kojih neka do danas nisu prevladana. U kontekstu ekologije i razmatranju utjecaja na okoliš neki autori pužne prijenosnike uzimaju za primjer strojnih elemenata koje u praksi treba izbjegavati.

2.1 Izvedbe pužnih parova

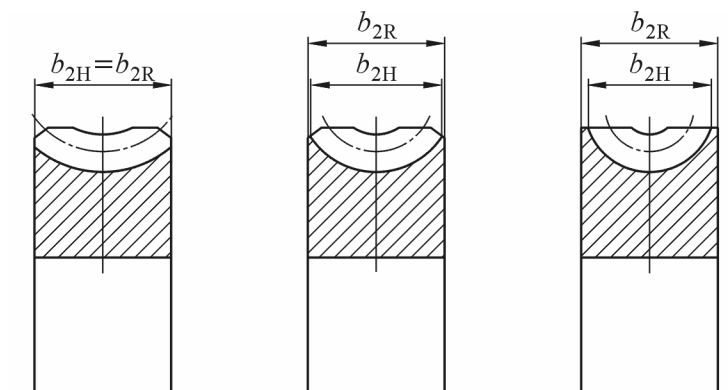
Obzirom na oblik, puž i pužno kolo mogu biti cilindrični ili globoidni. U tom smislu razlikuju se tri izvedbe prijenosnika [5] (slika 2.2.):

- Cilindrični puž i globoidno pužno kolo,
- Globoidni puž i cilindrično pužno kolo,
- Globoidni puž i globoidno pužno kolo.



Slika 2.2 Izvedbe pužnih parova obzirom na oblik puža i pužnog kola

Širina pužnog kola, zavisno od konstrukcijskog rješenja, ne mora biti jednaka aktivnoj širini boka. Zavisno od izvedbe razlikuju se tri slučaja [6, 7] (slika 2.3).



Slika 2.3 Širina pužnog kola i aktivna širina boka pužnog kola

Pored navedenih izvedbi treba napomenuti da puž može biti izveden s jednom ili više zavojnica (jednohodni, dvohodni itd.) koje mogu biti desne ili lijeve. Omjer broja zubi pužnog kola i broja zavoja puža određuje prijenosni omjer pužnog para. Uobičajeno je puž pogonski, a pužno kolo gonjeni član. U obratnom je slučaju iskoristivost manja od 50%.

Oblik boka je jedna od najvažnijih značajki pužnog para. Zavisno od geometrije alata i načina izrade, razlikujemo sljedeće uobičajene izvedbe [8]:

- A (ZA) – Arhimedov spiralni puž,
- N (ZN) – približno spiralni puž,
- K (ZK) – konveksni puž
- E (ZE) – evolventni puž,
- H (ZH) – konkavni puž
- G (ZG) – globoidni puž.

Premda je kinematika kod navedenih oblika bokova slična, uvjetovana gibanjem puža i pužnog kola, ipak postoje razlike, kako u proizvodnji, tako i u radu. Provedeno se istraživanje može primijeniti na bilo koji od navedenih oblika jer je riječ o praćenju pojava koje nastaju tijekom uobičajenog rada prijenosnika. Budući da je istraživanje provedeno na paru s cilindričnim desnim dvohodnim pužem s N (ZN) izvedbom boka i globoidnim pužnim kolom, u daljnjem će se tekstu podrazumijevati puž i pužno kolo tog tipa.

Obzirom na složenost geometrije pužnog para u postupku određivanja polja zahvata se koristi nekoliko ravnina i njima pripadnih presjeka puža ili pužnog kola. U cilju boljeg razumijevanja pojedinih pojmova definirani su kako slijedi [1]:

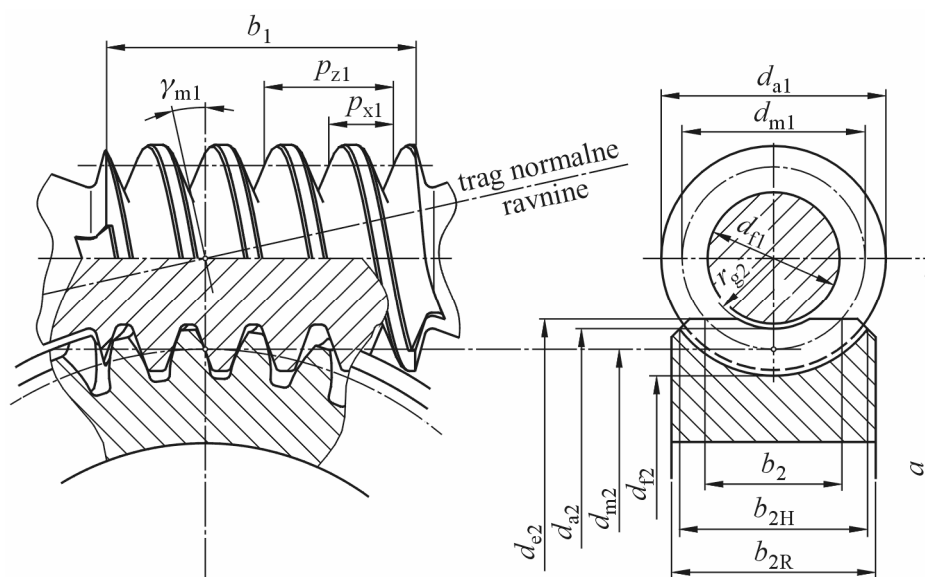
- Aksijalna ravnina – prolazi kroz os vrtnje puža
- Čeona ravnina – okomita je na aksijalnu ravninu, odnosno os vrtnje puža
- Normalna ravnina – ravnina otklonjena od aksijalne ravnine za srednji kut uspona

- P-ravnina – bilo koja ravnina paralelna s aksijalnom ravninom, a koja na odabranoj udaljenosti daje profil (presjek) boka puža
- Aksijalni presjek – presjek aksijalnom ravninom
- Čeoni presjek – presjek čeonom ravninom
- Normalni presjek – presjek normalnom ravninom
- P-presjek – presjek P-ravninom

Pojedine geometrijske veličine označene su indeksom ravnine na koju se odnose ili indeksom m ako je riječ o srednjim vrijednostima odnosno vrijednostima na diobenim promjerima puža ili pužnog kola.

2.2 Opis ZN puža

ZN puž je približno spiralni puž, a može se proizvesti tokarenjem nožem trapeznog oblika ako je otklonjen od aksijalne ravnine za veličinu kuta uspona navoja puža. Ovaj oblik se može postići i brušenjem profilom ravnih bokova, otklonjenim od aksijalne ravnine kao i kod tokarenja, s time da se simetrala profila brusne ploče poklapa (u projekciji) s presjecištem osi puža i pužnog kola. U normalnom je presjeku uzubina trapeznog oblika, a u aksijalnom su bokovi lagano ispupčeni. Trag u čeonom presjeku ima približan oblik Arhimedove spirale. Osnovne dimenzije pužnog para prema [6] prikazane su na slici 2.4.



Slika 2.4 Osnovne dimenzije pužnog para

2.3 Proizvodnja puževa i pužnih kola

Puževi se proizvode glodanjem, brušenjem ili tokarenjem, a kod velikih serija i valjanjem [9, 10]. Zbog ograničenja u pristupa alata oblik boka zuba u velikoj mjeri zavisi o tehnologiji proizvodnje. Pužna se kola uobičajeno proizvode [9, 10] odvalnim glodanjem alatom u obliku puža i to najčešće postupkom radijalnog dodavanja (primicanja glodala pužnom kolu u svakom sljedećem koraku obrade), općenito ocjenjenim kao najekonomičnijim. Postupak tangencijalnog glodanja (s tangencijalnim posmakom alata) koristi se kod pužnih kola velikih kutova uspona ili precizno izvedenih profila. Alat za ovakav postupak se može grubo usporediti s ureznicom za navoj, budući da prednji dio alata grubo obrađuje uzubinu dok zadnji dio alata dovršava obradu. Pored navedenih često se koristi i prolazno rezanje (*fly cutting*). Alat u ovom postupku odgovara jednom zubu iz završnog stupnja alata za tangencijalno glodanje. Posmak je također tangencijalan s tom razlikom da se jednim jednostavnijim alatom obrađuje cijela uzubina. Zbog jednostavnosti alata njegova je cijena značajno manja od prethodno navedenih te ga je lakše proizvesti, ali postupak traje duže zbog manjeg broja reznih oštrica i malog tangencijalnog posmaka kako bi se postigla visoka točnost. Često se u proizvodnji preciznih pužnih kola kombiniraju radijalno ili tangencijalno glodanje kao postupci za grublje radove i prolazno rezanje u završnoj obradi.

Istraživanja u području pužnih parova u posljednjih 20 godina značajno su usmjerena u dva područja:

- Iznalaženje matematičko-fizikalnog modela za opis složenih procesa u dodiru pužnih parova te pokušaj predviđanja uzorka i brzine trošenja odnosno optimalnih uvjeta za duži vijek trajanja i sigurniji rad.
- Izučavanje postojećih profila bokova i konstruiranje novih u cilju poboljšavanja uvjeta zahvata.

Potonje se područje najvećim dijelom odnosi na primjenu računala u analizi geometrije puževa i pužnih kola s variranjem pojedinih geometrijskih veličina (dimenzije puža/pužnog kola, odnos pojedinih dimenzija, prazni hod, deformacije zuba, vratila puža, itd.). U skladu s trendovima u proizvodnji, istraživanjima su uglavnom obuhvaćeni parovi gdje su pužna kola proizvedena predimenzioniranim alatom (*oversized hob/fly cutter*). Navedeni se postupak često povezuje s poboljšanjem uvjeta za stvaranje uljnog filma na ulaznoj strani polja zahvata [12, 13]. Isto se, međutim, može razmotriti i s aspekta proizvodnje.

Obzirom na zahtjeve preciznosti, alati za izradu pužnih kola radijalnim ili tangencijalnim glodanjem složene su geometrije, odgovarajuće kvalitete materijala i visokog stupnja završne obrade. Navedene osobine impliciraju i adekvatnu cijenu koštanja pa je jasno da isplativost mogu postići samo dužom uporabom. Budući da je riječ o obradi odvajanjem čestica alati su podložni trošenju te smanjenju razine točnosti. Oštrenje alata

neizbježno vodi smanjenju dimenzija što u konačnici znači da dimenzije pužnog kola, proizvedenog ovakvim alatom, ne bi odgovarale pripadnom pužu, odnosno do dodira između zavojnice puža i pužnog kola bi u jednom trenutku rada dolazilo samo na ulaznoj i izlaznoj strani. Alati se stoga proizvode veći, za predviđeni vijek trajanja i materijale, uzimajući u obzir i održavanje, odnosno oštrenje. Utjecaj povećanog polumjera zakrivljenosti na rad pužnog para (nevezano uz ostale zahvate inducirane navedenim) se očituje u koncentraciji dodira u središtu boka zuba pužnog kola [9]. Popratne pogodnosti ovakvog postupka obrade su izbjegavanje koncentriranog dodira na rubnim dijelovima bokova zubi pužnog kola te poboljšani uvjeti za stvaranje uljnog filma na ulaznoj strani zuba pužnog kola.

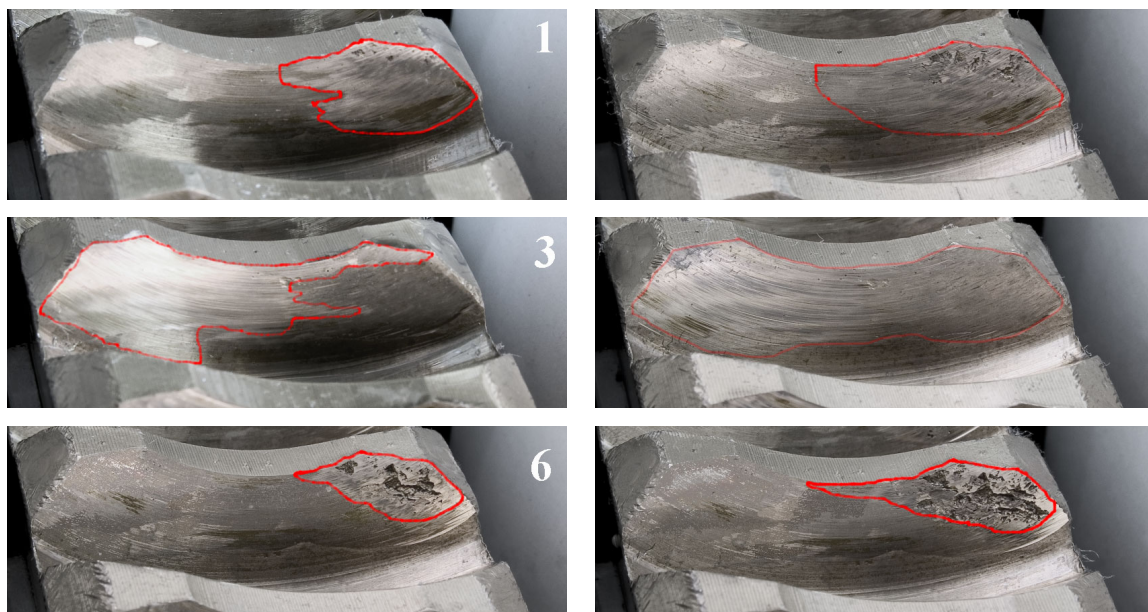
Općenito je ideja o omogućavanju boljih uvjeta za stvaranje uljnog filma dugo prisutna. Prema [10] nepoželjno je da dodir između bokova započne na samom rubu ulazne strane boka zuba pužnog kola jer dolazi do odnošenja (struganja) ulja s boka puža te na taj način umanjuje utjecaj podmazivanja. Uobičajena je praksa u proizvodnji pužnih kola [9] malo zakrenuti alat obzirom na kut od 90° (zavisno od dimenzija pužnog kola, $0,1^\circ$ do $0,2^\circ$) kako bi se stvorila forma klina, pospješilo uvlačenje ulja i stvaranje uljnog filma. Stvaranje klina može se postići i aksijalnim pomakom pužnog kola obzirom na puž umetanjem instrument limova (vidi odjeljak 9.1).

Ako se pretpostavi ispravan rad pužnog para te uzme u obzir trošenje pužnog kola s vremenom će doći do prilagodbe bokova zuba pužnog kola bokovima puža te pune slike nošenja. Bridovi zuba pužnog kola postaju oštri (vidi odjeljak 5.1.1, slika 5.4, i odjeljak 5.1.3, slika 5.12), dodir započinje na bridu boka, a navedene prednosti se gube. Bilo bi potrebno utvrditi označava li to početak pojačanog trošenja zbog smanjenog utjecaja podmazivanja ili su navedene prednosti značajne samo u periodu uhodavanja pužnog para.

Točnost izrade ima velik utjecaj na radne karakteristike pužnog para. Kako se u radu postižu male debljine uljnog filma (vidi poglavlje br. 3) geometrijske greške mogu rezultirati značajno različitim uvjetima zahvata za pojedine zube pužnog kola, a prema tome i različitim razinama trošenja i oštećenja. Obzirom na složenu geometriju, čak i relativno male greške u aksijalnoj točnosti vrtnje mogu za posljedicu imati prenošenje dodira iz ciljanog izlaznog na ulazni dio zuba pužnog kola (njihanje zahvata po horizontali). Isto tako, greške u radijalnoj točnosti vrtnje mogu rezultirati variranjem zahvata po visini (njihanje zahvata po vertikali). Kratkoročne posljedice ovakvih grešaka tijekom uhodavanja očituju se u izmjeni veličine i položaja polja zahvata, brzini postizanja pune slike nošenja, neujednačenosti trošenja te stupanja djelovanja. Dugoročne posljedice se svode na intenziviranje kratkoročnih s mogućnošću izraženog trošenja pojedinih zuba pužnog kola i ostalih pojava koje mogu proizaći iz takvog stanja bokova.

Slika 2.5 prikazuje utjecaj netočnosti izrade (praćen u periodu od približno 102 sata na tri odabrana zuba) na postizanje slike nošenja i rupičenje kao direktnu posljedicu loše slike

nošenja. Lijevi stupac prikazuje fotografije odabranih zuba s približno naznačenom slikom nošenja, a desni iste zube nakon približno $4,96 \cdot 10^5$ promjena. Izmjerena odstupanja glede točnosti vrtnje u aksijalnom i radijalnom smjeru uz sliku 2.5 dana su u tablici 2.2.



Slika 2.5 Utjecaj netočnosti izrade na postizanje slike nošenja položaj i intenzitet oštećenja nakon $4,96 \cdot 10^5$ promjena (približno 102 sata pri 1450 o/min)

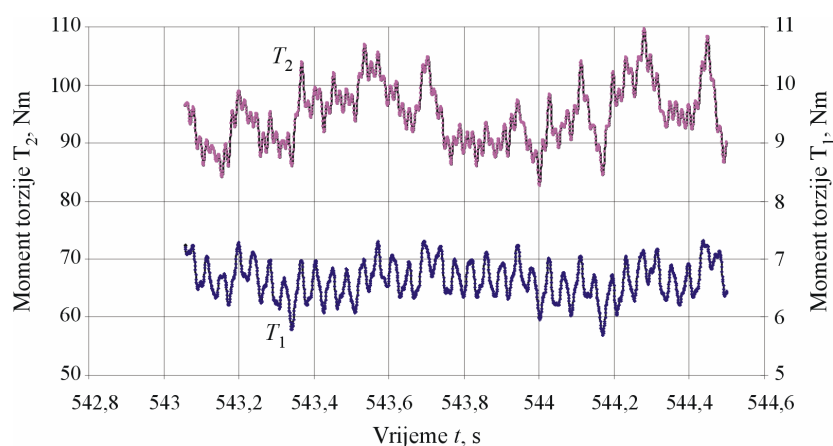
Tablica 2.2 Odstupanja točnosti vrtnje u radijalnom i aksijalnom smjeru

Broj zuba	Aksijalna točnost vrtnje	Radijalna točnost vrtnje	Mjerenje aksijalne točnosti vrtnje	Mjerenje radijalne točnosti vrtnje
1	-0,12	-0,105		
2, ref.	0	0		
3	0,055	0,095		
4	0,005	0,045		
5	-0,12	-0,085		
6	-0,17	-0,165		

Kod zuba br. 1 i 6 se može vidjeti negativno aksijalno odstupanje od referentne vrijednosti (postavljene čeonu na vijencu pužnog kola kod zuba br. 2 u aksijalnom smjeru i na tjemenu promjeru u radijalnom) što prema shemi mjerenja ukazuje na pomak slike nošenja prema izlaznoj strani boka (desno). Kod zuba br. 3, kod kojeg postoji pozitivan pomak, je slika nošenja pomaknuta prema ulaznoj strani boka. U radijalnom su smjeru najveća odstupanja na zubima br. 1 i 6 što ukazuje na pomak slike nošenja prema tjemenu pužnog kola. Kod zuba br. 3 je pomak pozitivan pa je slika nošenja pomaknuta prema korijenu. Budući da su kod zuba br. 1 i 6 oba odstupanja negativna ukazuju na pomicanje slike nošenja desno i gore, odnosno smanjenje površine zahvata. Posljedica odstupanja se

očituje u progresivnom rupičenju površina bokova. Za razliku, kod zuba br. 3, gdje su oba odstupanja pozitivna, postigla se nakon $4,96 \cdot 10^5$ promjena puna slika nošenja.

Prema [11] točnost izrade pužnih parova ima vitalnu ulogu u primjenama kao što su npr. servo i podioni mehanizmi. Stoga je jasna težnja za utvrđivanjem kinematske preciznosti odnosno grešaka prijenosa (TE – *transmission error*). Kontrola točnosti prijenosa se provodi na posebnim uređajima visoke razlučivosti (npr., digitalno-optički uređaj s 36.000 mjernih točaka po okretu). Kod prijenosnika snage zahtjev za točnosti nije utemeljen na ciljanoj preciznosti uređaja već na postizanju ravnomjerne slike nošenja kako bi se ujednačili uvjeti prijenosa za većinu ili sve zube puža i pužnog kola. Primjer greške prijenosa za jedan okret pužnog kola prikazan je na slici 2.6.



Slika 2.6 Greška prijenosa za jedan okret pužnog kola

Za radne parametre promatranog prijenosnika jednostavno je utvrditi teoretsko vrijeme između ulaska u zahvat zuba pužnog kola. Nazivna brzina vrtnje pužnog kola, uz poznatu brzinu vrtnje elektromotora te prijenosni omjer, iznosi

$$n_2 = \frac{n_1}{i} = \frac{1450}{18 \cdot 60} = 1,342 \text{ s}^{-1}$$

pa je vrijeme potrebno za puni okret

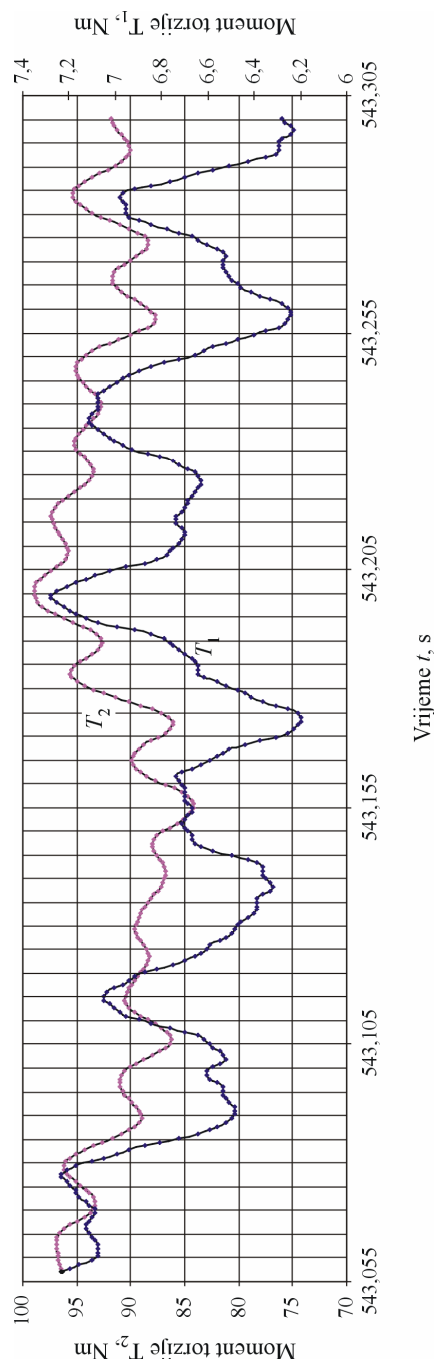
$$t_{\text{okret}} = \frac{1}{n_2} = \frac{1}{1,342} \approx 0,745 \text{ s.}$$

Budući da pužno kolo ima 36 zuba teoretski bi vrijeme između dva početka zahvata iznosilo

$$t_{1z} = \frac{t_{\text{okret}}}{z_2} = \frac{0,745}{36} \approx 0,0207 \text{ s}$$

što odgovara frekvenciji od približno 48 zahvata u sekundi. Uz navedenu frekvenciju uzorkovanja bila bi, tijekom svakog zahvata, zabilježena jedna točka. Veću razlučivost zahvata moguće je postići povećanjem frekvencije uzorkovanja u iznosu koji zavisi o željenom broju točaka. S tim je ciljem frekvencija uzorkovanja postavljena na 1200 u

sekundi kako bi teoretsko vrijeme jednog zahvata bilo podijeljen na 24 intervala. Slika 2.7 prikazuje 0,25 sekundi rada prijenosnika tijekom kojih su zubi, prema prikazanim vrijednostima, ušli u zahvat 12 puta. Uzimajući u obzir i stupanj prekrivanja (vidi 3.2) jasno je da će, prije nego jedan promatrani zub izađe, novi zub ući u zahvat s zavojnicom puža.



Slika 2.7 Zahvat između zubi puža i pužnog kola s 1200 uzoraka u sekundi

Zahvat zuba se, između ostalog, promatra i s aspekta deformacije i razlike u brzini gonjenog zupčanika kada opterećenje preuzimaju jedan ili dva para zuba [5]. Kod preuzimanja cijelog opterećenja (kada je u zahvatu samo jedan par zuba) dolazi do deformacije pogonskog i gonjenog zuba. Uslijed deformacije gonjenog zuba dolazi do

zaostajanja gonjenog zupčanika za neki kut. Kada u zahvat ulazi novi par zuba teoretski preuzima pola opterećenja, a deformacija prethodnog para se smanjuje pa gonjeni zupčanik ubrzava. Ove pojave imaju za posljedicu kolebanje kutne brzine gonjenog zupčanika, ali i pojavu unutrašnjih dodatnih dinamičkih opterećenja (uslijed ubrzavanja i usporavanja gonjenog zupčanika u kratkom vremenskom intervalu). U idealnom slučaju (miran rad, koraci na zupčanicima jednaki za sve zube) krivulja opterećenja bi poprimila neku cikličku formu. Kod realnog pužnog para međutim se vidi naglašena neujednačenost zahvata pojedinih zuba (slika 2.7), odnosno neravnomjeran raspored opterećenja koji se očituje u razlici oblika krivulja ulaznog i izlaznog momenta torzije. Kako je vrijeme u kojem dolazi do nepravilnosti kratko te približno odgovara teoretskom vremenu između dva zahvata opravdano je pretpostaviti da su one posljedica geometrijskih netočnosti puža i pužnog kola, a ne možebitnih utjecaja ostale opreme na ispitnom postolju. Uzme li se u obzir veza između ulaznog i izlaznog momenta izražena u obliku

$$\frac{T_2}{T_1} = i \cdot \eta$$

vidljivo je da se navedene nepravilnosti moraju odraziti na prijenosni omjer i stupanj korisnog djelovanja. Kako prema [5] kut zaostajanja nema veliki utjecaj na kinematiku zupčanika u zahvatu za praktične se potrebe uzima da je prijenosni omjer konstantan, a razlika momenata se očituje kroz stupanj korisnog djelovanja. Realno, stupanj korisnog djelovanja i prijenosni omjer koji se koriste u proračunima predstavljaju srednje vrijednosti.

Bokovi zuba koji preuzimaju veće opterećenje više će se trošiti što se može zaključiti iz izraza 5.5 i 5.6 gdje je očekivano istrošenje proporcionalno srednjem dodirnom pritisku. Za očekivati je da će nakon određenog perioda rada (zavisno o opterećenju) doći do ujednačavanja trošenja te dokidanja možebitnih grešaka u geometriji. Postavlja se pitanje jesu li, za isti broj izmjena opterećenja, dijelovi bokova pojedinih zubi bili opterećeni preko dopuštene granice? Prema važećoj normi za proračun nosivosti pužnih parova [7] utjecaj unutrašnjih dodatnih dinamičkih opterećenja (faktor K_v) kao i utjecaj raspodjele opterećenja (faktori $K_{H\alpha}$ i $K_{H\beta}$) se mogu zanemariti uz pretpostavku precizne izrade i provedenog uhodavanja.

Osnove o dodiru

Strojni sustavi (kao što su npr. klizni i valjni ležajevi, zupčanički prijenosi, pužni zupčanički prijenosi, razni drugi mehanizmi i sl.) ostvaruju međusobni dodir u točki ili po crti. Porastom sile i pojavom elastičnih deformacija, točke i crte postaju površine dodira s izmjerama vrlo malim u usporedbi s izmjerama strojnih dijelova u dodiru. Navedeni su elementi, poradi principa njihovog djelovanja, tijekom eksploatacije izloženi teškim radnim uvjetima što im je zajednički nazivnik.

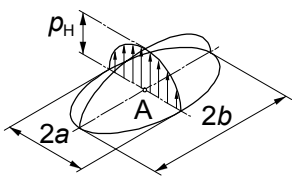
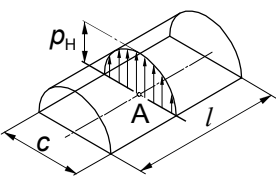
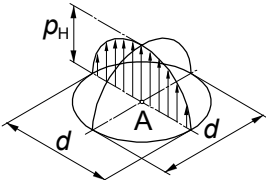
Površine dodira se u literaturi često nazivaju Hertzovim površinama dodira ili Hertzovim kontaktnim površinama. Zbog sila koje djeluju okomito na njih, na mjestima dodira javlja se kontaktno ili Hertzovo naprezanje [14].

Kontaktna ili površinska čvrstoća dijelova u dodiru pri statičkom opterećenju tlačnom silom ocjenjuje se prema maksimalnom kontaktnom naprezanju

$$\sigma_{H,\max} = p_H$$

koje se javlja u središtu površine dodira A (tablica 3.1)

Tablica 3.1 Geometrijski oblici i izmjere površina dodira

Dodir u točki		Dodir po crti	
a	Eliptična	c	Pravokutna
			
			

p_H – Hertzov pritisak ili kontaktno naprezanje

Naprezanja na površinama dodira smanjuju se udaljavanjem od točke A po nelinearnoj zakonitosti. Nelinearna zakonitost postoji i kod zavisnosti između površina dodira i vrijednosti normalne sile F .

U općem slučaju dodira dvaju zaobljenih tijela opterećenih silom F , na mjestu dodira (točka A, tablica 3.1) formiraju se površine dodira koje se po geometrijskom obliku mogu sistematizirati prema tablici 3.2. U slučaju da je polumjer zakrivljenosti površine dodira jednog od tijela mnogo veći u odnosu na ostale izmjere, promatra se slučaj dodira zaobljenog tijela s ravnom pločom.

U tablici 3.2 [15] dat je pregled osnovnih kombinacija geometrijskih tijela u dodiru glede geometrijskog oblika površina dodira iz tablice 3.1. Kod složenih, prostornih površina (čelnici s kosim zubima, vijčanici, pužni parovi) dodir se, teoretski, ostvaruje u točki gdje sve moguće točke dodira predstavljaju polje zahvata [1].

Tablica 3.2 Pregled osnovnih kombinacija geometrijskih tijela u dodiru glede geometrijskih oblika površina dodira iz tablice 3.1

a	Eliptična površina dodira - Dodir u točki			
b	Kružna površina dodira - Dodir u točki			
c	Pravokutna površina dodira - Dodir po crti			

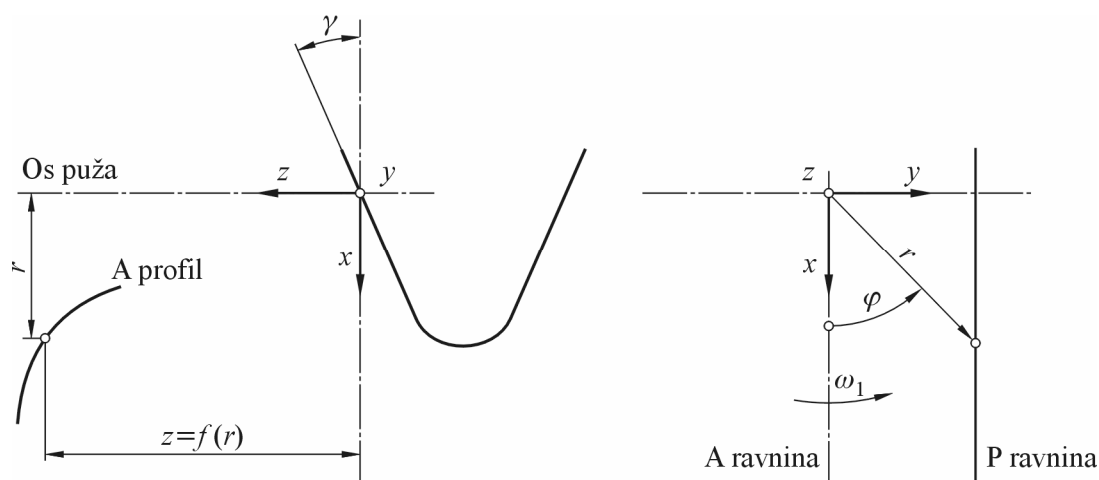
Navedene kombinacije odnose se isključivo na geometriju površina u direktnom dodiru. Uvjeti i pojave u pogonu značajno su složenije, poglavito kod elemenata koji su predviđeni za rad u prisustvu maziva. Njihov dodir rezultira cijelim nizom međusobno spregnutih hidrodinamičkih, termodinamičkih, mehaničkih i kemijskih procesa (poglavlje br. 5) koji im, općenito uzevši, smanjuju performanse i vijek trajanja te u konačnici vode potpunom gubitku funkcije. Pored geometrijskih oblika površina u dodiru, navedeni procesi zavise i o ostalim općim elementima sustava (vidi poglavlje 5.1).

Trenje se nalazi među najvažnijim pojavama u dodiru između dva strojna elementa. Obzirom na trenje možemo ih podijeliti na dvije skupine:

- elemente čije se djelovanje temelji na prisutnosti trenja (npr. tarenice, kočnice) i
- elemente kod kojih je trenje nepoželjno (npr. zupčanici, ležajevi).

3.1 Dodir kod pužnih parova (TCA)

Bok zuba puža (prostorna zavojna površina) nastaje zavojnim kretanjem izvodnice aksijalnog presjeka puža (A- profil) ili srednjeg prosječnog profila oko osi puža. Za analitički opis ove površine koristi se cilindrični koordinatni sustav (r, φ, z) , a za određivanje zahvatnih linija i polja zahvata podjednako i prostorni pravokutni koordinatni sustav (x, y, z) . Navedeni sustavi, položeni prema osi puža, prikazani su na slici 3.1 [1].



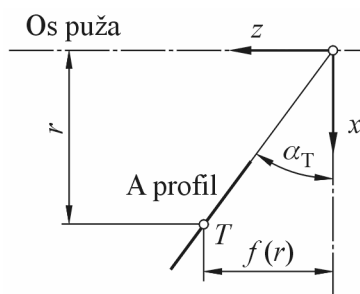
Slika 3.1 Koordinatni sustavi u analizi zahvata pužnog para

Površina boka zuba se može pomoću cilindričnih koordinata prikazati u pravokutnom sustavu pomoću sljedećih izraza:

$$x = r \cdot \cos \varphi, \quad y = r \cdot \sin \varphi, \quad z = f(r) + \frac{P}{2 \cdot \pi} \cdot \varphi. \quad 3.1$$

Za početnu vrijednost kuta $\varphi=0$ dobije se uvrštavanjem u gornje izraze jednadžba profila u aksijalnom presjeku

$$x = r, \quad y = 0, \quad z = f(r). \quad 3.2$$



Slika 3.2 Profil boka u aksijalnom presjeku (A-profil)

Funkcija $f(r)$ određuje se u aksijalnoj ravnini na temelju kuta tangente profila u promatranoj točki (slika 3.2).

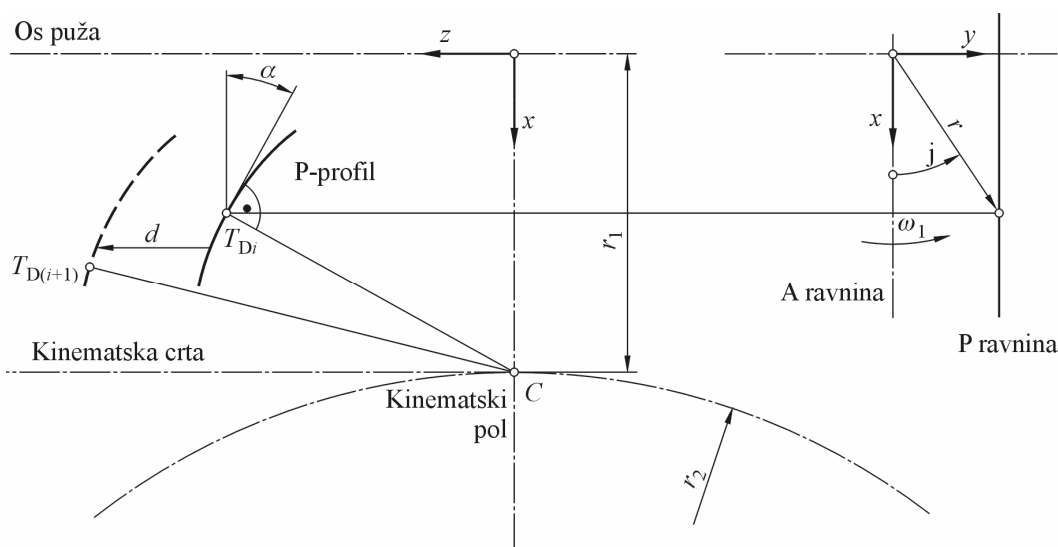
$$f(r) = r \cdot \tan \alpha_T$$

3.3

3.1.1 Zahvatne linije i polje zahvata

Ako se puž vrti u smjeru kazaljke na satu kutnom brzinom ω_1 , A-profil boka će se u aksijalnoj ravnini gibati s lijeva u desno (slika 3.2). U slučaju da je kut kojeg zatvaraju osi vrtnje 90° profil boka puža u aksijalnoj ravnini daje vrlo jednostavnu zahvatnu liniju koja odgovara zahvatu zupčaste letve (aksijalni presjek puža) s profilima srednjeg presjeka zuba pužnog kola. Za presjeke koji leže izvan središnje ravnine pužnog kola može se dodir svesti na zahvat ozubnice s odgovarajućim profilom pužnog kola. Ozubnice su određene uvođenjem P-ravnina koje presjekom s bokom puža daju P-profile. Zakrivljenost i nagibi P-profila se međusobno razlikuju, pa će i zahvatne linije poprimati različite nagibe. Gibanjem puža i pužnog kola nastaje profil boka pužnog kola u svakoj P-ravnini.

Analitički postupak određivanja zahvatnih linija temelji se na osnovnom zakonu ozubljenja. P-ravnine određuju presjeke zavojne površine boka (P-profile), a točka T_D predstavlja presjecište zahvatne linije i odgovarajućeg P-profila. Prema osnovnom zakonu ozubljenja mora normala na P-profil u točki dodira prolaziti kroz kinematski točku C.

Slika 3.3 Određivanje točke T_D u skladu s osnovnim zakonom ozubljenja

Iz prethodne slike proizlazi izraz za određivanje položaja dodirnih točaka T_{Di} :

$$z_i - \frac{r_{01} - x}{\tan \alpha} = 0 \quad 3.4$$

gdje je:

α – kut nagiba tangente na P-profil u točki dodira

r_{01} – udaljenost kinematske ravnine od osi puža

$z_i = f(r) + \frac{P}{2 \cdot \pi} \cdot \varphi$ – koordinata točke dodira.

Zakretanjem puža u smjeru ili nasuprot smjera gibanja kazaljke na satu (pozitivno ili negativno) za kut ϑ pomiče se P- profil u lijevu ili desnu stranu za vrijednost d . Koordinata z tada ima vrijednost:

$$z_{i+1} = z_i + d \quad 3.5$$

$$d = -\frac{P}{2 \cdot \pi} \cdot \vartheta \quad 3.6$$

Geometrijsko mjesto mogućih točaka zahvata T_D između puža i pužnog kola (za beskonačno mali prirast kuta zakreta ϑ , beskonačno velik broj P-profila i beskonačno mali korak u smjeru x osi) naziva se polje zahvata. Uzme li se u obzir izraz 3.4 te pomak uslijed zakretanja puža d , može se izraz za polje zahvata napisati u obliku

$$d + z_i - \frac{r_{01} - x}{\tan \alpha} = 0. \quad 3.7$$

Kut nagiba tangente na P-profil u točki dodira α može se dobiti parcijalnom derivacijom po x osi izraza za z koordinatu površine boka zuba (izraz 3.1).

$$\tan \alpha = \frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial f(r)}{\partial r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{P}{2 \cdot \pi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad 3.8$$

Uzimanjem u obzir odnose pojedinih veličina određenih u aksijalnom presjeku

$$\frac{\partial f(r)}{\partial r} = \tan \alpha_T; \frac{\partial r}{\partial x} = \cos \varphi; \frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\sin \varphi \frac{1}{r}; \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot r} = \tan \gamma \quad 3.9$$

može se gornji izraz prepisati u novom obliku:

$$\tan \alpha = \frac{\partial z}{\partial x} = \tan \alpha_T \cdot \cos \varphi - \tan \gamma \cdot \sin \varphi. \quad 3.10$$

Uvrštavanjem izraza 3.6 i 3.10 u 3.7 te prevođenjem u cilindrične koordinate pomoću izraza 3.1 dobije se jednadžba polja zahvata 3.11.

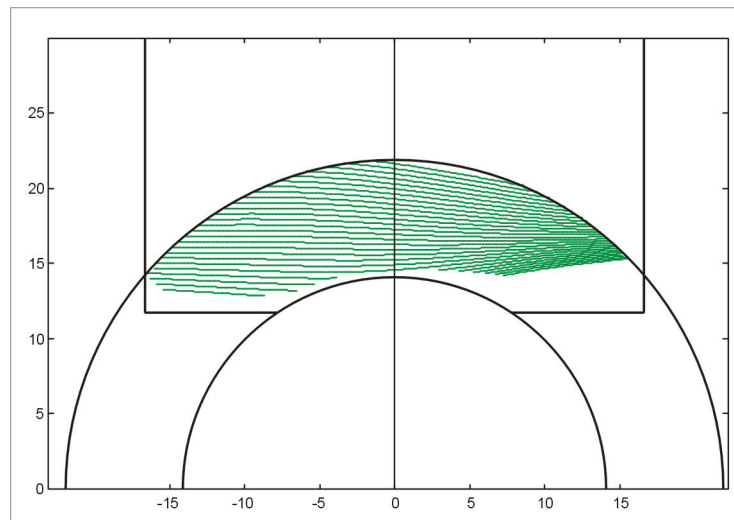
$$F(r, \varphi, \vartheta) = f(r) + \frac{P}{2 \cdot \pi} \cdot (\varphi - \vartheta) - \frac{r_{01} - r \cdot \cos \varphi}{\tan \alpha_T \cdot \cos \varphi - \tan \gamma \cdot \sin \varphi} = 0. \quad 3.11$$

Ako se iz gornjeg izraza dokine kut zakreta ϑ na način da se uzme kao konstantna veličina ostaju varijable r i φ jedine promjenjive veličine. U tom slučaju izraz 3.11 predstavlja projekciju zahvatnih linija u čenoj ravnini kao rezultat presjeka boka puža s poljem zahvata

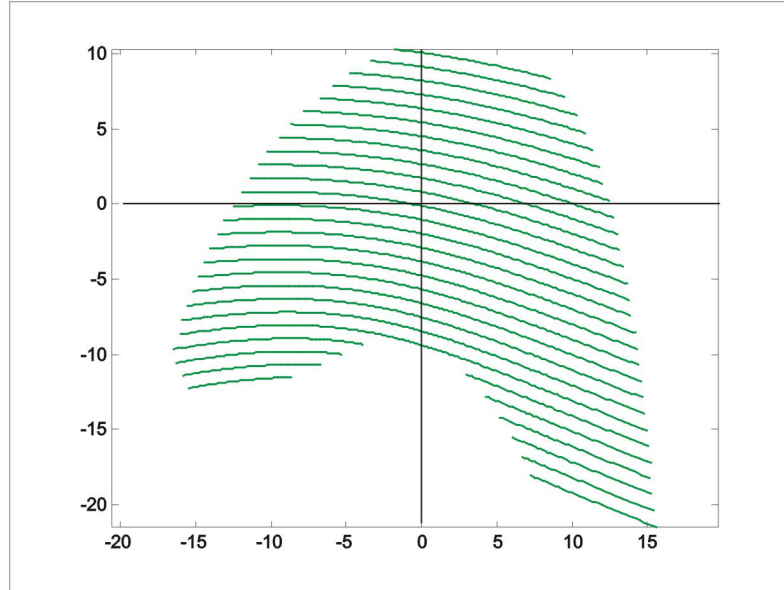
$$\vartheta = \text{const.} \rightarrow F(r, \varphi) = 0. \quad 3.12$$

Budući da na raspolaganju stoji samo jedan izraz s dvije nepoznanice rješavanje jednadžbe se svodi na traženje vrijednosti jedne od varijabli postupkom postepenog približavanja (npr. binarnom interpolacijom) kada je drugoj vrijednost odabrana, a čija kombinacija ispunjava uvjet.

Za pužni par korišten u istraživanju (vidi poglavlje 2) određeno je navedenim algoritmom polje zahvata. Vrtanja pogonskog člana je u smjeru kazaljke na satu gledano s ulazne strane prijenosnika. Algoritam ne uključuje pretpostavke vezane uz hrapavost ili nepravilnost površina bokova, kao niti greške u izradi vezane uz razliku koraka između zuba puža i pužnog kola.



Slika 3.4 Polje zahvata u x-y ravnini (čena ravnina)



Slika 3.5 Polje zahvata u y-z ravnini (tangencijalna ravnina)

3.1.2 Određivanje polumjera zakrivljenosti bokova

Za određivanje polumjera zakrivljenosti bokova zuba puža i pužnog kola kao i odnosa brzina u točki dodira T_D mora biti poznat pravac zahvatne linije i položaj tangentne ravnine na bok zuba u toj točki. Pravac zahvatne linije može se odrediti pomoću jediničnog tangencijalnog vektora na dodirnu liniju, a položaj tangentne ravnine pomoću jediničnog vektora normale

3.1.2.1 Jedinični tangencijalni vektor na dodirnu liniju

Jedinični tangencijalni vektor \mathbf{e}_t može se u pravokutnom koordinatnom sustavu zapisati u obliku:

$$\mathbf{e}_t = (x_t, y_t, z_t). \quad 3.13$$

Za potrebe određivanja \mathbf{e}_t zahvatna se linija u pravokutnom koordinatnom sustavu definira pomoću radij-vektora \mathbf{t}_R . Varijable u izrazu su cilindrične koordinate r i φ , a povezuje ih izraz koji određuje zahvatnu liniju 3.12.

$$\mathbf{t}_R = (x(r, \varphi), y(r, \varphi), z(r, \varphi)); \text{ sa } F(r, \varphi) = 0. \quad 3.14$$

Jedinični tangencijalni vektor \mathbf{e}_t na liniju dodira dobije se deriviranjem radij-vektora po jednom od parametara r ili φ te naknadnim normiranjem:

$$\mathbf{e}_t = (x_t, y_t, z_t) = \frac{d\mathbf{t}_R / dr}{|d\mathbf{t}_R / dr|} = \frac{d\mathbf{t}_R / d\varphi}{|d\mathbf{t}_R / d\varphi|} = \frac{\mathbf{t}}{|\mathbf{t}|} \quad 3.15$$

gdje je \mathbf{t} tangencijalni vektor. Derivacija komponente tangencijalnog vektora u smjeru x osi glasi:

$$\frac{dx}{dr} = \frac{\partial x}{\partial r} + \frac{\partial x}{\partial \varphi} \frac{d\varphi}{dr}, \quad 3.16$$

a derivacije u smjeru y i z osi su analogne. Pojedine parcijalne derivacije određuju se iz izraza za transformaciju između cilindričnog i pravokutnog koordinatnog sustava 3.1 te pomoću izmijenjenog oblika jednadžbe zahvatnih linija:

$$F(r, \varphi) = \tan \alpha z_{T_D} - r_{01} + r \cdot \cos \varphi = 0 \quad 3.17$$

gdje je $z_{T_D} = f(r) + \frac{P}{2 \cdot \pi} \cdot (\varphi - v)$. Derivacija $d\varphi/dr$ glasi

$$\frac{d\varphi}{dr} = - \frac{\partial F / \partial r}{\partial F / \partial \varphi}, \quad 3.18$$

a pojedine parcijalne derivacije kako slijedi:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial r} &= \frac{\partial \tan \alpha}{\partial r} \cdot z_{T_D} + \tan \alpha \cdot \frac{\partial z_{T_D}}{\partial r} + \cos \varphi \\ \frac{\partial F}{\partial \varphi} &= \frac{\partial \tan \alpha}{\partial \varphi} \cdot z_{T_D} + \tan \alpha \cdot \frac{\partial z_{T_D}}{\partial \varphi} - r \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad 3.19$$

Iz izraza 3.1 i 3.16 slijedi:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dr} &= \cos \varphi - r \cdot \sin \varphi \frac{d\varphi}{dr} \\ \frac{dy}{dr} &= \sin \varphi + r \cdot \cos \varphi \frac{d\varphi}{dr} \\ \frac{dz}{dr} &= \frac{df(r)}{dr} + \frac{P}{2 \cdot \pi} \frac{d\varphi}{dr} \end{aligned} \quad 3.20$$

Jednadžbe 3.20 predstavljaju nenormirane komponente tangencijalnog vektora \mathbf{t} . Normiranjem se dobije x komponenta jediničnog tangencijalnog vektora \mathbf{e}_t

$$x_t = \frac{dx/dr}{\sqrt{(dx/dr)^2 + (dy/dr)^2 + (dz/dr)^2}}, \quad 3.21$$

a izrazi za komponente y i z analogno. Uvrštavanjem izraza 3.18 do 3.20 u 3.21 i analogne izraze za komponente y i z mogu se komponente vektora \mathbf{e}_t napisati u obliku

$$x_t = \frac{\cos \varphi \frac{\partial F}{\partial \varphi} + r \cdot \sin \varphi \frac{\partial F}{\partial r}}{\sqrt{A}}$$

$$y_t = \frac{\sin \varphi \frac{\partial F}{\partial \varphi} + r \cdot \cos \varphi \frac{\partial F}{\partial r}}{\sqrt{A}} \quad 3.22$$

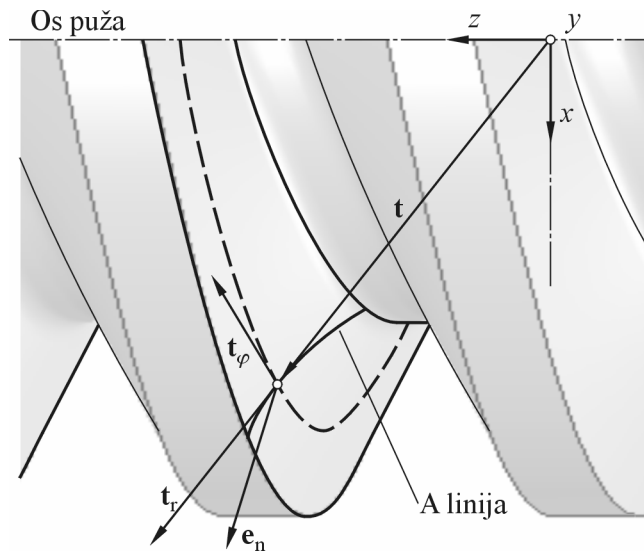
$$z_t = \frac{\tan \alpha_T \frac{\partial F}{\partial \varphi} - \frac{P}{2 \cdot \pi} \frac{\partial F}{\partial r}}{\sqrt{A}}$$

gdje je

$$A = \left(\cos \varphi \frac{\partial F}{\partial \varphi} + r \cdot \sin \varphi \frac{\partial F}{\partial r} \right)^2 + \left(\sin \varphi \frac{\partial F}{\partial \varphi} - r \cdot \cos \varphi \frac{\partial F}{\partial r} \right)^2 + \left(\tan \alpha_T \frac{\partial F}{\partial \varphi} - \frac{P}{2 \cdot \pi} \frac{\partial F}{\partial r} \right)^2.$$

3.1.2.2 Jedinični vektor normale boka zuba puža

Normala na tangencijalnu ravninu u točki dodira može se također odrediti pomoću radij-vektora (vidi sliku 3.6).



Slika 3.6 Jedinični vektor normale e_n boka zuba puža

Jednadžba površine boka zuba puža (izraz 3.1) može se zapisati u vektorskom obliku na sljedeći način:

$$\mathbf{t} = (x, y, z) = \left(r \cdot \cos \varphi, r \cdot \sin \varphi, f(r) + \frac{P}{2 \cdot \pi} \cdot \varphi \right) \quad 3.23$$

Parcijalnim deriviranjem po koordinatama r i φ dobiju se dva vektora kojima je određena tangencijalna ravnina u točki dodira:

$$\mathbf{t}_r = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial r} = \left(\frac{\partial x}{\partial r}, \frac{\partial y}{\partial r}, \frac{\partial z}{\partial r} \right); \quad \mathbf{t}_\varphi = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial \varphi} = \left(\frac{\partial x}{\partial \varphi}, \frac{\partial y}{\partial \varphi}, \frac{\partial z}{\partial \varphi} \right). \quad 3.24$$

Vektor \mathbf{t}_r je tangencijalan na A-profil, a vektor \mathbf{t}_φ na liniju zavojnice. Oba vektora su okomita na vektor \mathbf{e}_n , pa će njihov vektorski produkt biti paralelan. Normiran vektorski produkt daje upravo jedinični vektor normale:

$$\mathbf{e}_n = (x_n, y_n, z_n) = \frac{\mathbf{t}_\varphi \times \mathbf{t}_r}{|\mathbf{t}_\varphi \times \mathbf{t}_r|}. \quad 3.25$$

Komponente vektora \mathbf{e}_n su kako sljede:

$$\begin{aligned} x_n &= \frac{\cos \varphi \cdot \tan \alpha_T - \tan \gamma \cdot \sin \varphi}{\sqrt{\tan^2 \alpha_T + \tan^2 \gamma + 1}} \\ y_n &= \frac{\sin \varphi \cdot \tan \alpha_T + \tan \gamma \cdot \cos \varphi}{\sqrt{\tan^2 \alpha_T + \tan^2 \gamma + 1}} \\ z_n &= \frac{-1}{\sqrt{\tan^2 \alpha_T + \tan^2 \gamma + 1}} \end{aligned} \quad 3.26$$

3.1.2.3 Polumjeri zakrivljenosti u točki dodira

Dodir bokova zubi puža i pužnog kola u točki dodira T_D može se zamijeniti dodirom ekvivalentnog cilindra polumjera ρ_N i dužine dl s tangencijalnom ravninom u istoj točki. Dodirna linija cilindra i tangenta na dodirnu liniju u točki dodira se poklapaju. Za odrediti ρ_N moraju se prethodno odrediti polumjeri zakrivljenosti ρ_1 i ρ_2 P-profila boka puža i pužnog kola u točki dodira. Pomoću njih se dalje može odrediti ekvivalentni polumjer zakrivljenosti ρ u P- presjeku, a zatim, preračunavanjem na normalni presjek, i polumjer ekvivalentnog cilindra u normalnom presjeku ρ_N .

3.1.2.4 Polumjer zakrivljenosti boka zuba puža u P-presjeku

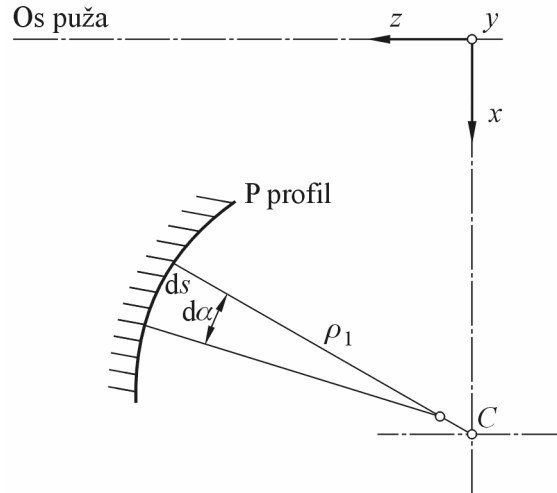
Temeljna postavka za određivanje polumjera proizlazi iz analize P-profila (slika 3.7):

$$K = \frac{1}{r} = \frac{d\alpha}{ds} \quad 3.27$$

Polumjer zakrivljenosti ρ_1 P-profila određen je izrazom

$$K = \frac{1}{\rho_1} = - \frac{\partial^2 z / \partial x^2}{\left(1 + (\partial z / \partial x)^2\right)^{\frac{3}{2}}} = - \cos^3 \alpha \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \quad 3.28$$

gdje negativan predznak ima značenje konveksne zakrivljenosti (za konkavan bok $\rho_1 > 0$).



Slika 3.7 Zakrivljenost profila u P-ravnini (P-profil)

Ponovljenom derivacijom izraza 3.10 po x dobije se

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{\partial \tan \alpha}{\partial x} = \frac{\partial \tan \alpha_T}{\partial x} \cdot \cos \varphi + \tan \alpha_T \cdot \frac{\partial \cos \varphi}{\partial x} - \frac{\partial \tan \gamma}{\partial x} \cdot \sin \varphi - \frac{\partial \sin \varphi}{\partial x} \cdot \tan \gamma. \quad 3.29$$

Uzimajući u obzir odnose

$$\frac{\partial \tan \alpha_T}{\partial x} = -\frac{\cos \varphi}{\cos^3 \alpha_T \rho_T}, \quad \frac{\partial \cos \varphi}{\partial x} = \frac{\sin^2 \varphi}{r} \quad 3.30$$

$$\frac{\partial \tan \gamma}{\partial x} = -\frac{\tan \gamma \cdot \cos \varphi}{r}, \quad \frac{\partial \sin \varphi}{\partial x} = -\frac{\sin \varphi \cdot \cos \varphi}{r} \quad 3.31$$

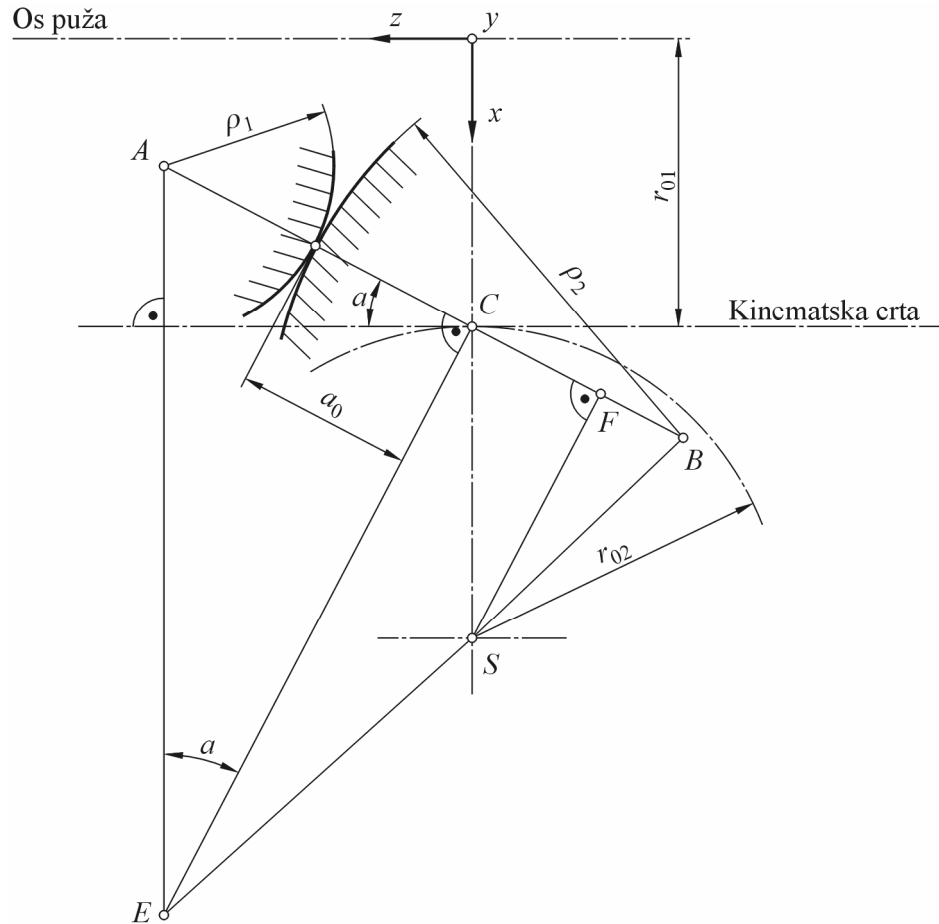
te zamjenom u izrazu 3.29 dobije se izraz za određivanje polumjera zakrivljenosti P-profila boka puža:

$$\frac{1}{\rho_1} = \cos^3 \alpha \cdot \left(\frac{\cos^2 \varphi}{\cos^3 \alpha_T \rho_T} - \frac{\tan \alpha_T \cdot \sin^2 \varphi}{r} - 2 \cdot \frac{\tan \gamma \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{r} \right). \quad 3.32$$

3.1.2.4.1 Polumjer zakrivljenosti boka zuba pužnog kola u P- presjeku

Bok zuba pužnog kola određuje se na temelju osnovnog zakona ozubljenja, tj. kotrljanjem ozubnice puža u P-ravnima svojim kinematskim crtama po krugu kotrljanja pužnog kola. Za radijus zakrivljenja pužnog kola ρ_2 , pored radijusa zakrivljenja profila zuba puža, prije svega je mjerodavan i proces kotrljanja (slika 3.8). Polumjer zakrivljenosti profila boka zuba pužnog kola ρ_2 u P-presjeku može se odrediti prema slici 3.8 na temelju sličnosti trokuta ACE i CFS:

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{\rho_1 - a_0 + r_{02} \cdot \sin \alpha}{r_{02} \cdot \sin \alpha \cdot \rho_1 + a_0 \cdot (\rho_1 - a_0)}. \quad 3.33$$

Slika 3.8 Veza između polumjera zakrivljenosti ρ_1 i ρ_2

3.1.2.4.2 Ekvivalentni polumjer zakrivljenosti u P-presjeku

Uvrštavanjem izraza za polumjere zakrivljenosti P-profila bokova puža 3.32 i pužnog kola 3.33 u izraz

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \quad 3.34$$

dobije se nakon sređivanja izraz za ekvivalentni polumjer zakrivljenosti u P-presjeku

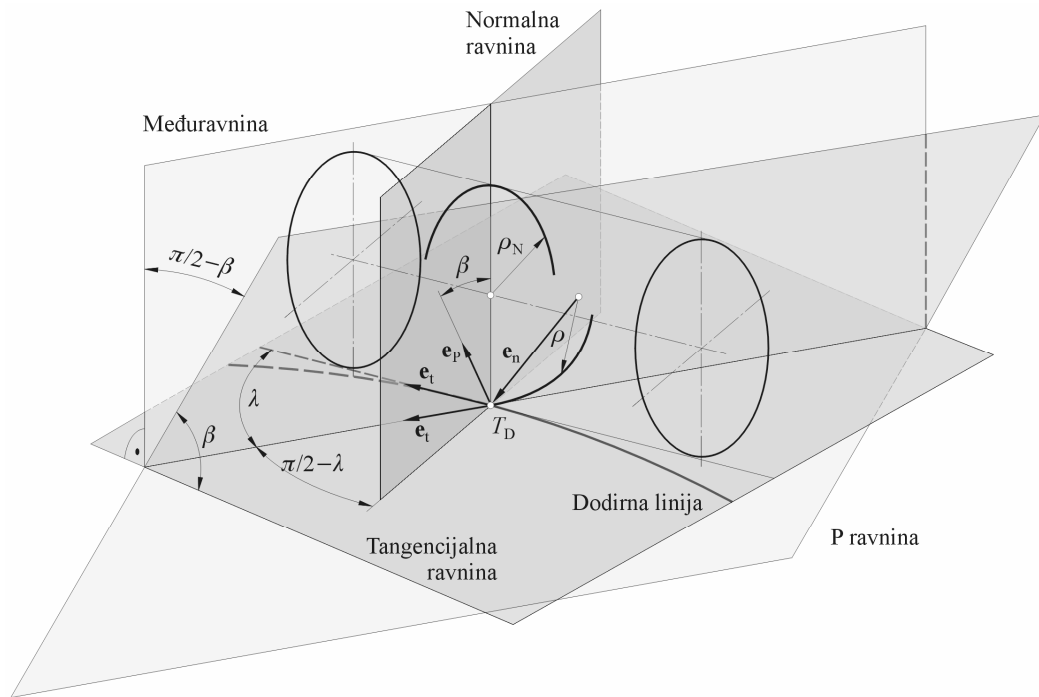
$$\rho = \frac{r_{02} \cdot \sin \alpha + a_0 \cdot (1 - a_0 / \rho_1)}{(1 - a_0 / \rho_1)^2}. \quad 3.35$$

3.1.2.4.3 Ekvivalentni polumjer zakrivljenosti u normalnom presjeku

U općem slučaju P- ravnina siječe ekvivalentni cilindar koso u odnosu na os cilindra. Za prelazak iz P- ravnine u ravninu normalnog presjeka ekvivalentnog cilindra potrebno je provesti dvije rotacije kako je prikazano slikom 3.9:

- rotaciju za kut $\pi/2 - \beta$ (P- ravnina \rightarrow međuravnina) i

- rotaciju za kut $\pi/2 - \lambda$ (međuravnina \rightarrow ravnina normalnog presjeka).



Slika 3.9 Veza između polumjera zakrivljenosti ρ i ρ_N

Pri rotaciji za kut $\pi/2 - \lambda$ vrijedi prema Eulerovoj formuli

$$\frac{1}{R} = \frac{\cos^2(\pi/2 - \lambda)}{R_1} + \frac{\sin^2(\pi/2 - \lambda)}{R_2} \quad 3.36$$

gdje je:

R – polumjer u međuravnini

$R_2 = \infty$ za cilindar

$R_1 = \rho_N$

Nagib za kut $\pi/2 - \beta$

$$\rho = R \cdot \cos(\pi/2 - \beta) \quad 3.37$$

Uporabom izraza 3.36 i 3.37 dobije se traženi polumjer zakrivljenosti u normalnoj ravnini:

$$\rho_N = \rho \cdot \frac{\sin^2 \lambda}{\sin \beta} \quad 3.38$$

Za određivanje kutova λ i β potrebno je u razmatranje uvesti još dva vektora: jedinični vektor normale P- ravnini

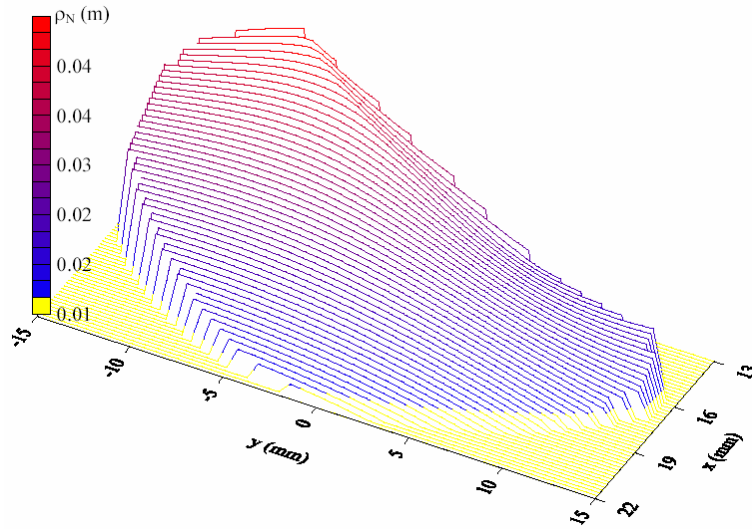
$$\mathbf{e}_p = (0, 1, 0)$$

jedinični tangencijalni vektor na P- profil

$$\mathbf{e}_s = (\cos \alpha, 0, \sin \alpha)$$

Iz slike 3.9 proizlaze izrazi za kutove λ i β :

$$\begin{aligned}\sin \lambda &= |\vec{\mathbf{e}}_t \times \vec{\mathbf{e}}_s| \\ \sin \beta &= |\vec{\mathbf{e}}_n \times \vec{\mathbf{e}}_p|\end{aligned}\tag{3.39}$$



Slika 3.10 Ekvivalentni polumjeri zakrivljenosti u polju zahvata

3.1.3 Brzine u polju zahvata

Poznato je da brzina ima velik utjecaj na postizanje i učinak hidrodinamičkog podmazivanja. Za razliku od npr. klasičnog kliznog ležaja, ali i čelnika s ravnim zubima, brzine u polju zahvata pužnog para imaju daleko složeniji karakter. Uvjetovane su dodirom dvije zakrivljene prostorne površine od kojih jedna (pužno kolo) ostvaraje rotacijsko, a druga (pužni vijak) rotacijsko i aksijalno gibanje.

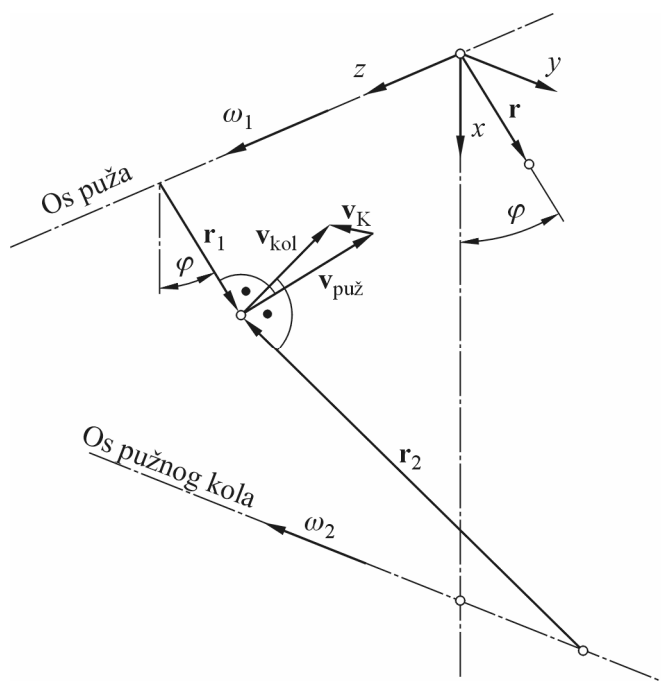
3.1.3.1 Brzina klizanja između bokova zubiju puža i pužnog kola

Kao i za analizu zahvata, os z leži na osi rotacije puža. Brzine u pojedinim točkama dodira određuju se na temelju kutne brzine i polumjera na kojem se točke nalaze. Puž rotira kutnom brzinom ω_1 , a pužno kolo brzinom ω_2 :

na boku puža:	na boku pužnog kola:
$\mathbf{v}_{\text{puž}} = \boldsymbol{\omega}_1 \times \mathbf{r}_1$	$\mathbf{v}_{\text{kol}} = \boldsymbol{\omega}_2 \times \mathbf{r}_2$
gdje je	
$\boldsymbol{\omega}_1 = (0, 0, \omega_1)$	$\boldsymbol{\omega}_2 = (0, -\omega_2, 0)$
$\mathbf{r}_1 = (r_1 \cdot \cos \varphi, r_1 \cdot \sin \varphi, 0)$	$\mathbf{r}_2 = (r_1 \cdot \cos \varphi - a, 0, z)$

Brzina klizanja predstavlja relativnu brzinu boka pužnog kola u odnosu na bok puža. Klizanje bokova je uzrok postojanja gubitaka u ozubljenju. Brzina klizanja, koja leži u tangencijalnoj ravni, utječe na faktor trenja (brzina klizanja odgovara brzini uvlačenja medija između površina u dodiru) i određuje pravac sile trenja u točki dodira.

$$\mathbf{v}_K = \mathbf{v}_{kol} - \mathbf{v}_{puž} \quad 3.40$$



Slika 3.11 Brzina klizanja obzirom na brzine puža i pužnog kola u točki dodira

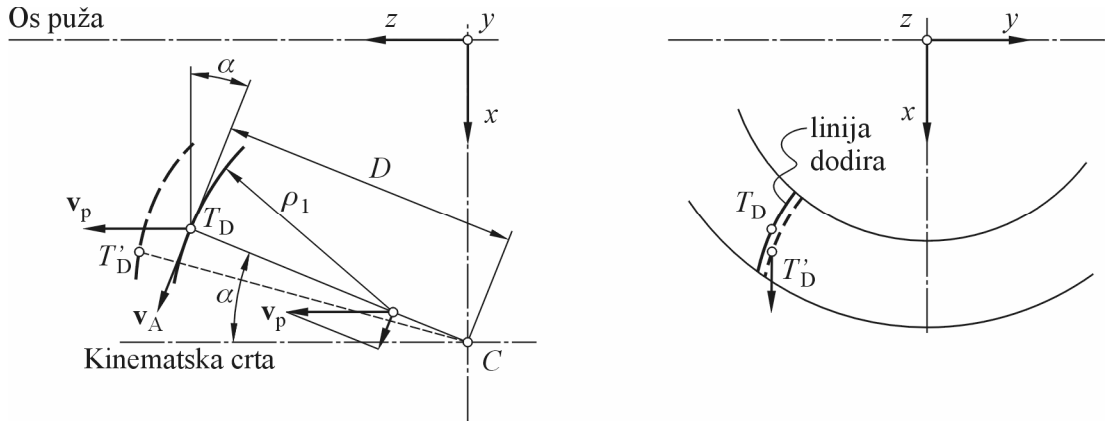
3.1.3.2 Brzina pomicanja zahvatne linije po boku zuba puža

Za vrijeme trajanja zahvata zahvatna se linija pomiče po boku puža. Brzina pomicanja je pri tome uvijek okomita na zahvatnu liniju. Brzina P- profila u pravcu osi puža dana je izrazom

$$\mathbf{v}_p = (0, 0, -\omega_1 \cdot P / 2 \cdot \pi), \quad 3.41$$

a brzina točke dodira T_D u P-presjeku sa

$$\mathbf{v}_A = \left(Dv_p \cdot \frac{\sin \alpha \cdot \cos \alpha}{D - \rho_1}, 0, Dv_p \cdot \frac{\sin^2 \alpha}{D - \rho_1} \right). \quad 3.42$$



Slika 3.12 Brzina P-profila u smjeru osi puža i brzina točke dodira u P-presjeku

Na temelju navedenih brzina može se odrediti relativna brzina zahvatne linije u odnosu na koordinatnu sustav:

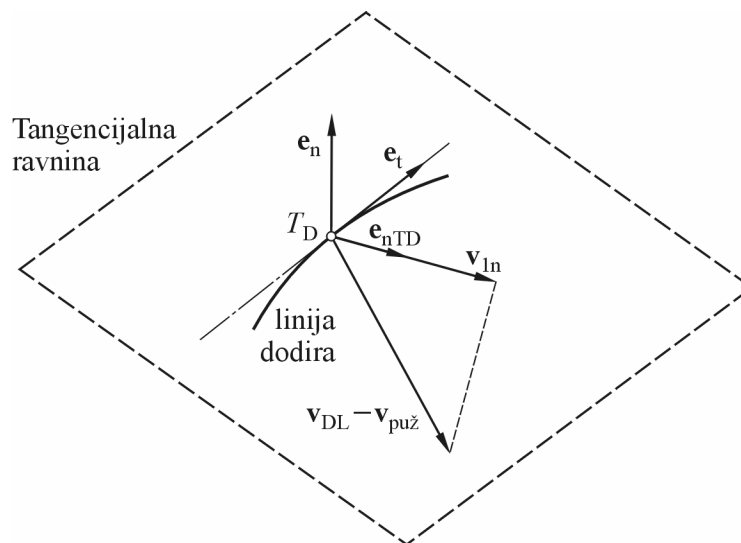
$$\mathbf{v}_{DL} = \mathbf{v}_P + \mathbf{v}_A. \quad 3.43$$

Jedinični vektor normale zahvatne linije, potreban za određivanje brzine pomicanja zahvatne linije po boku zuba puža, određuje se vektorskim produktom jediničnog tangencijalnog vektora zahvatne linije \mathbf{e}_t i jediničnog vektora normale boka zuba puža \mathbf{e}_n :

$$\mathbf{e}_{nTD} = \mathbf{e}_n \times \mathbf{e}_t. \quad 3.44$$

Brzina pomicanja zahvatne linije dobije se kao razlika relativne brzine zahvatne linije i brzine puža u točki dodira (vidi sliku 3.13):

$$v_{ln} = (\mathbf{v}_{DL} - \mathbf{v}_{puž}) \cdot \mathbf{e}_{nTD}. \quad 3.45$$



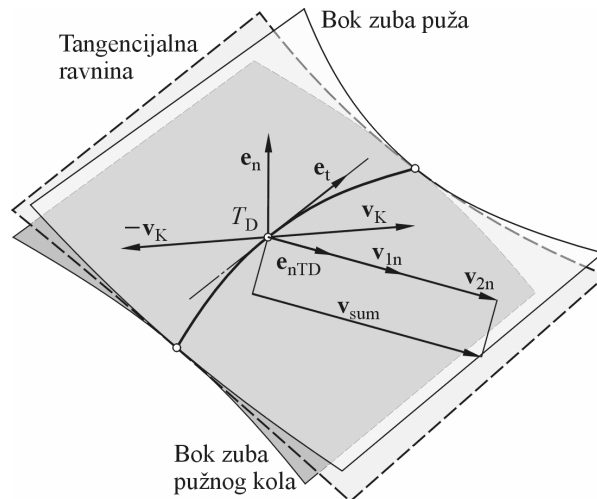
Slika 3.13 Pomak zahvatne linije po boku zuba puža

3.1.3.3 Brzina pomicanja zahvatne linije po boku zuba pužnog kola

Određuje se analogno brzini pomicanja po boku zuba puža, samo obzirom na pužno kola u točki dodira:

$$v_{2n} = (\mathbf{v}_{DL} - \mathbf{v}_{kol}) \mathbf{e}_{nTD} \cdot \quad 3.46$$

Komponente brzine pomicanja zahvatne linije v_{1n} i v_{2n} , normalne u odnosu na zahvatnu liniju, određuju vrijeme trajanja zahvata između bokova zuba puža i pužnog kola (slika 3.14).

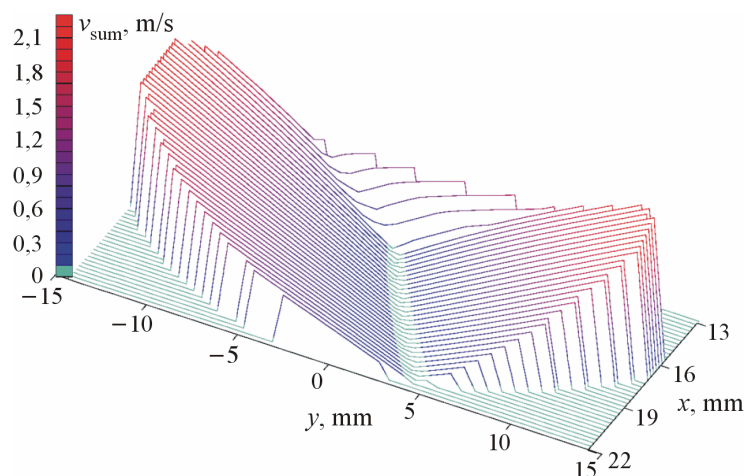


Slika 3.14 Brzine u zahvatu bokova zuba puža i pužnog kola

3.1.3.4 Sumarna brzina

Druga komponenta brzine u točki dodira, a koja također leži u ravnini tangencijalnoj na oba boka u točki dodira je brzina kotrljanja. Sumarna brzina (slika 3.15) je mjerodavna za ocjenu uvjeta uvlačenja maziva u uljni klin, a određena je brzinama v_{1n} i v_{2n} :

$$v_{sum} = |v_{1n} + v_{2n}| = \left| (2\mathbf{v}_{DL} - \mathbf{v}_{puž} - \mathbf{v}_{kol}) \mathbf{e}_{nTD} \right| \cdot \quad 3.47$$



Slika 3.15 Profil sumarnih brzina

Iz geometrijskih odnosa prikazanih prethodnom slikom proizlazi

$$\varepsilon_m \approx \frac{\overline{EE_A}}{\cos \alpha_0 \cdot \cos^2 \gamma_m} \cdot \frac{1}{p_{x1}}, \quad 3.51$$

a uz

$$\overline{EE_A} = \overline{T_1E_A} - \overline{T_1C} + \overline{EC}$$

$$\varepsilon_m \approx \frac{\overline{T_1E_A} - \overline{T_1C} + \overline{EC}}{\cos \alpha_0 \cdot \cos^2 \gamma_m \cdot p_a} \approx \frac{\sqrt{r_{a2}^2 - (r_{m2} \cdot \cos \alpha_0)^2} - \sqrt{r_{m2}^2 - (r_{m2} \cdot \cos \alpha_0)^2} + \frac{h_{am1}}{\sin \alpha_0}}{\cos \alpha_0 \cdot \cos^2 \gamma_m \cdot p_{x1}}. \quad 3.52$$

Stupanj prekrivanja se razlikuje zavisno od izvedbe pužnog para (vidi poglavlje 2), a za prijenosnik korišten u ispitivanju, izračunat prema gornjem izrazu, iznosi približno 1,89. Dakle, u slučaju precizne izrade puža i pužnog kola prosječno će od početne do krajnje točke zahvata opterećenje preuzimati 1,89 parova zubi. Ako međutim postoje greške u koracima puža i/ili pužnog kola ili debljinama zuba opterećenje se neće raspodijeliti ravnomjerno, tj. pojedini zubi u zahvatu će u nekom dijelu puta zahvata biti više ili manje opterećeni.

3.3 Trenje

Trenje i trošenje prate čovjeka od njegova postanka, u nekim stvarima na korist, a u nekim na štetu [16]. Trenje u općem slučaju predstavlja sumu otpora relativnom gibanju dvaju tijela u dodiru: otpora elastičnoj i plastičnoj deformaciji, otpora brazdanju i otpora kidanju adhezijskih veza. Zavisno od gibanja trenje između dodirnih ploha može biti:

- trenje sklizanja
- trenje kotrljanja
- trenje uslijed istovremenog sklizanja i kotrljanja.

Općenito je poznato da je za istu kombinaciju materijala faktor trenja kotrljanja manji od faktora trenja sklizanja, a potonji najveće vrijednosti poprima u slučajevima suhog (nepodmazivanog) dodira i malih brzina te u režimu podmazivanog dodira s uspostavljenim filmom maziva kod većih brzina (vidi sliku Stribeck u uvodu). Područje između suhog dodira i dodira preko uspostavljenog filma maziva može se podijeliti na tri manja [17]:

- područje mikro-elastohidrodinamičkog podmazivanja ,
- područje mješovitog ili djelomičnog EHD podmazivanja i
- područje graničnog podmazivanja.

Svako od navedenih područja opisano je istoimenom teorijom.

3.3.1 Teorije podmazivanja

Nakon što je Reynolds [18] krajem 19. stoljeća formulirao teoriju hidrodinamičkog podmazivanja (danas klasična HD teorija), istraživanje i razvoj teorija podmazivanja uglavnom imaju tendenciju rasta. Usprkos činjenici da rezultati proračuna prema HD teoriji nisu odgovarali dobivenima iz praktičnih istraživanja ista se, u nedostatku uspješnijeg modela, održala sve do 1959. godine, a za neke se primjene u proširenom obliku koristi i danas [19].

Dokumentiranim radovima iz 1936. godine pokazano je da elastična deformacija malih površina kod podmazivanih koncentriranih dodira igra važnu ulogu kod porasta hidrodinamičkog pritiska i formiranja mazivog filma. Premda su i u navedenom razdoblju istraživanja bila usmjerena prema afirmaciji ovakvog pristupa rješavanja problema podmazivanja, razlog stagnacije razvoja vjerojatno leži u općoj recesiji, 2. svjetskom ratu i njegovima dugoročnim posljedicama. Utemeljiteljima teorije elastohidrodinamičkog podmazivanja (EHD, 1959) smatraju se Dowson i Higginson [20] koji su doveli u vezu debljinu i pritisak u mazivom filmu s elastičnim deformacijama tijela u dodiru te ponudili numeričko rješenje problema.

Tablica 3.3 Pretpostavke na kojima se temelji klasična *Reynoldsova* teorija HD podmazivanja

	PARAMETRI ILI UTJECAJI	PRETPOSTAVKE
1	Gravitacijske sile mazivog filma	Zanemaruju se
2	Inercijske sile mazivog filma	Zanemaruju se
3	Mazivo	Newtonov viskozni fluid, nestlačivo
4	Viskozitet	Konstantan
5	Temperatura	Konstantna
6	Debljina mazivog filma	Mala u usporedbi s drugim izmjerama sistema
7	Smik (klizanje) na granici fluid-kruta površina	Ne postoji
8	Površinska napetost	Zanemaruje se
9	Stanje površina	Ravnomjerno hrapave, krute

Do pojave ove teorije, pomoću klasične Reynoldsove teorije HD podmazivanja, problem visoko opterećenih formalnih i neformalnih dodira bio je nerješiv jer je bilo teško za pretpostaviti da se podmazivanje može oduprijeti iznimno visokom dodirnom pritisku. Međutim, ako se pretpostavi zavisnost viskoziteta maziva o pritisku i uzme u obzir elastična deformacija tlačno opterećenih malih površina u dodiru, može se dokazati da je podmazivanje djelotvornije i u takvim uvjetima (obzirom na HD teoriju). Dva najvažnija djelovanja koja su prisutna u EHD teoriji, a ne uzimaju se u obzir u klasičnoj HD teoriji

upravo su utjecaj visokog pritiska na viskozitet tekućeg maziva i postojeća lokalna deformacija tijela u dodiru. Pretpostavke vezane uz HD teoriju podmazivanja prikazane su u tablici 3.3, a uz EHD teoriju u tablici 3.4.

Poradi ovakvog pristupa korjenito se mijenja predodžba o geometriji mazivog filma, a zajedno s njom i o raspodjeli pritiska u dodiru. Hidrodinamički pritisak koji raste mora biti ravnomjeran s elastičnim pritiscima u tijelima na mjestu dodira, a rješenje zajedničkog sustava jednadžbi podmazivanja i elastične deformacije određuje konačne EHD uvjete u području dodira.

Tablica 3.4 Pretpostavke na kojima se temelji teorija EHD podmazivanja

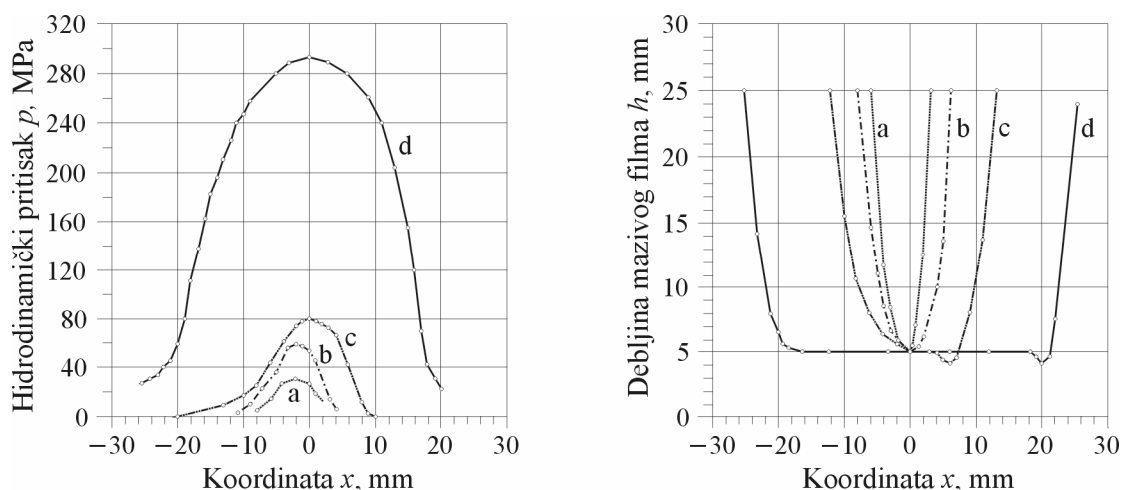
	PARAMETRI ILI UTJECAJI	PRETPOSTAVKE
1	Gravitacijske sile mazivog filma	Zanemaruju se
2	Inercijske sile mazivog filma	Zanemaruju se
3	Mazivo	Newtonov viskozni fluid
4		Stlačivo
5	Viskozitet maziva	Ovisi o tlaku
6	Temperatura	Konstantna
7	Debljina mazivog filma	Mala u usporedbi s drugim izmjerama sistema
8		Značajno ovisi o lokalnoj elastičnoj deformaciji
9	Smik (klizanje) na granici fluida- kruta površina	Ne postoji
10	Površinska napetost	Zanemaruje se
11	Stanje površina	Ravnomjerno hrapave
12		Krute ili deformabilne

Stalno usložavanje uvjeta eksploatacije i zahtjeva za produljenjem vijeka trajanja strojnih dijelova utjecalo je na potrebu pronalaženja novih maziva. Tako se mazivima mineralne baze dodaju tvari kojima se pospješuju svojstva te nude bolje osobine u podmazivanju, a poglavito kod visoko opterećenih dodira. Ovako konstruirana maziva više nemaju osobine *Newtonovih*³ *fluida*, jedne od osnovnih pretpostavki kod klasične HD i prvotne EHD teorije podmazivanja. Stoga i potonja, koja se temelji na gornjim pretpostavkama, zaslužuje atribut "klasična". Odnos između smičnog naprezanja i brzine smične deformacije opisuje se reološkim modelima, a zavisnost o pritisku tlačno-viskozitetnim koeficijentom (vidi poglavlje 4.3).

Utjecaj na pritisak i debljinu mazivog filma za četiri kombinacije parametara koji karakteriziraju klasičnu EHD teoriju prikazan je na slici 3.19 [21]. Dijagram je načinjen za

³ Model prema kojemu je smično naprezanje proporcionalno brzini smične deformacije.

slučaj dodira po crti cilindra koji klizi po nepomičnoj ravnoj podlozi uz ekvivalentni polumjer zakrivljenosti cilindra $R=2,0$ m, relativnu brzinu klizanja $u=1,0$ ms⁻¹, ekvivalentni modul elastičnosti $E'=108$ GPa, Poissonov omjer $\nu=0,3$ (materijal cilindra i materijal podloge su identični) te viskozitet maziva pri sobnoj temperaturi i atmosferskom pritisku $\eta_0=0,137$ Pas. Krivulje a, b, c i d odgovaraju odnosu nametnutih opterećenja u omjeru 1:2:4:6.

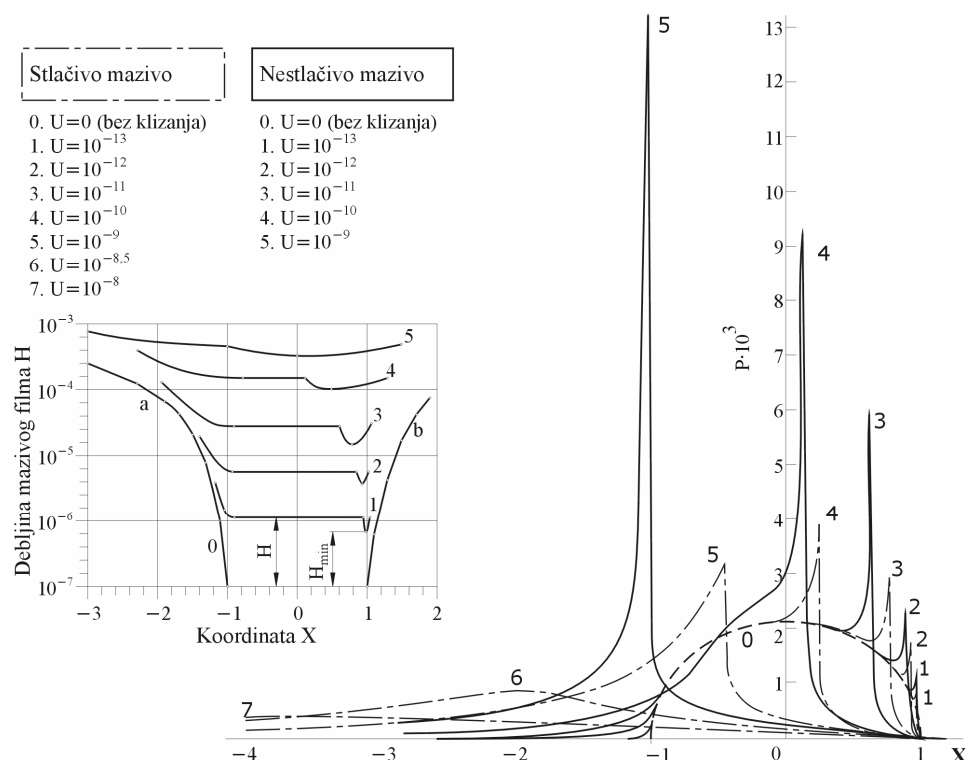


Slika 3.17 Utjecaj promjene viskoziteta i elastične deformacije na raspodjelu hidrodinamičkog pritiska i debljinu mazivog filma
a - kruti cilindar, konstantni viskozitet maziva;
b - kruti cilindar, viskozitet maziva ovisan o pritisku;
c - elastični cilindar, konstantni viskozitet maziva;
d - elastični cilindar, viskozitet maziva ovisan o pritisku.

Razmatranjem dijagrama doneseni su sljedeći zaključci:

- s povećanjem opterećenja povećava se područje u kojem je promjena debljine filma relativno mala; najmanja debljina mazivog filma, na izlazu, iznosi otprilike 3/4 iznosa gdje je promjena debljine gotovo paralelna s osi x,
- promjena debljine filma je relativno mala obzirom na značajnu promjenu opterećenja.

U svrhu potpunije predodžbe o utjecajima na opća svojstva mazivog filma razmatran je i utjecaj relativne brzine klizanja. Na slici 3.20 prikazan je utjecaj promjene relativne brzine klizanja na hidrodinamički pritisak i debljinu mazivog filma u slučaju dodira cilindra i ravne podloge uz podmazivanje mineralnim uljem [21].



Slika 3.18 Utjecaj relativne brzine klizanja na promjenu debljine mazivog filma

U dijagramu je $H=h/R$ - bezdimenzijska debljina mazivog filma, $X=x/b$ - bezdimenzijska koordinata, u - relativna brzina klizanja, U - bezdimenzijski parametar brzine klizanja i P - bezdimenzijska značajka pritiska, a načinjeni su za bezdimenzijski parametar opterećenja $F=3 \cdot 10^{-5}$ i bezdimenzijski parametar materijala $G=5000$.

Analizom dijagrama se mogu naglasiti sljedeće karakteristike:

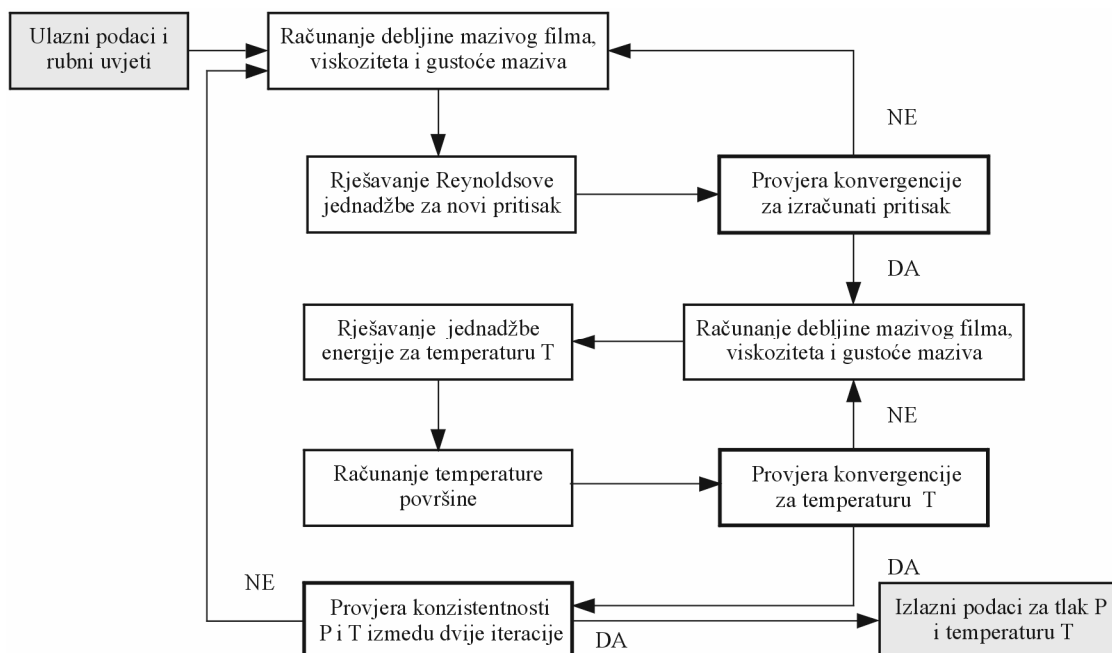
- s povećanjem relativne brzine klizanja raste debljina mazivog filma te pokriva sve veće područje Hertzovog dodira (vidjeti područje ograničeno krivuljama a i b),
- kod manjih brzina teorijska krivulja hidrodinamičkog pritiska gotovo se poklapa s krivuljom Hertzovog pritiska, a s povećanjem brzine dolazi do značajnog odstupanja
- s povećanjem brzine šiljak pritiska se pomiče prema ulaznoj strani dodira gdje, uz odgovarajuće brzine klizanja, može i iščeznuti
- u slučaju najmanje relativne brzine klizanja minimalna debljina mazivog filma iznosi približno 75% od one kod maksimalnog pritiska (u $X=0$), a s povećanjem brzine razlike postaju sve manje, da bi kod vrlo velikih brzina potpuno iščezla.

Na temelju navedenih teorija modeliran je dodir između dviju površina razmatranjem utjecajnih parametara te uz pripadne pretpostavke. U obje se teorije polazi od izotermnih uvjeta rada, odnosno konstantne temperature u području dodira.

I prije nego je formulirano konkretno rješenje EHD teorije podmazivanja istraživači su se bavili raznim pojavama vezanim uz rad i trošenje strojnih dijelova s direktnim podmazivanim dodirrom. Jedna od takvih pojava je zaribavanje⁴, oblik adhezijskog trošenja koji nastaje kada debljina mazivog filma nije dostatna za razdvajanje dviju površina koje se međusobno relativno gibaju. Direktni dodir metalnih površina, djelovanjem povišenog trenja, inducira nagli porast temperature te mikro-zavarivanje. Odmah zatim dolazi do kidanja mikro-zavara i odnošenja dijela materijala s jedne od površina. Na mjestu otkidanja materijala nastaje udubina na prvoj površini, a na mjestu zavara izbočina na drugoj. Ova će izbočina u daljnjem kontaktu djelovati kao abraziv te stvarati brazde na prvoj površini. 1937. godine Blok je postavio izraz za određivanje trenutnog porasta temperature (*flash* temperatura) kojom se tumačila pojava zaribavanja kod zupčanika te pokazao da se temperaturni profil u području kontakta mijenja [22]. U novije vrijeme, rezultatima istraživanja utjecaja temperature na podmazivanje [23], pokazano je da porast iznosa temperature već od 10°C može prouzročiti takvu promjenu viskoziteta koja će za posljedicu imati porast hidrodinamičkog tlaka za 28 MPa, odnosno konačnu posljedicu - smanjenje debljine mazivog filma. Svako smanjenje debljine mazivog filma, kod visokih opterećenja i velikih brzina, predstavlja opasnost njegovog prekida ili izgaranja zbog visoke temperature. Visoke temperature se mogu najbolje definirati kao temperature koje su dovoljno visoke da uzrokuju promjene i ograničenja koja su nepoznata kod nižih temperatura. Općenito, granice visokih temperatura za maziva su niže od onih za druge materijale u promatranom sustavu, a gornja granica temperature (glede ispravne funkcije sustava) određena je stabilnošću maziva [24]. Uzimanje ili ne uzimanje temperature u razmatranje ovisi ne samo o njenom iznosu već i o vremenu djelovanja. Tako se npr. uzima da trenutni porast temperature (*flash* temperatura) djeluje između 10^{-8} do 10^{-4} sekunde i dostiže iznose između 150°C i 500°C [24].

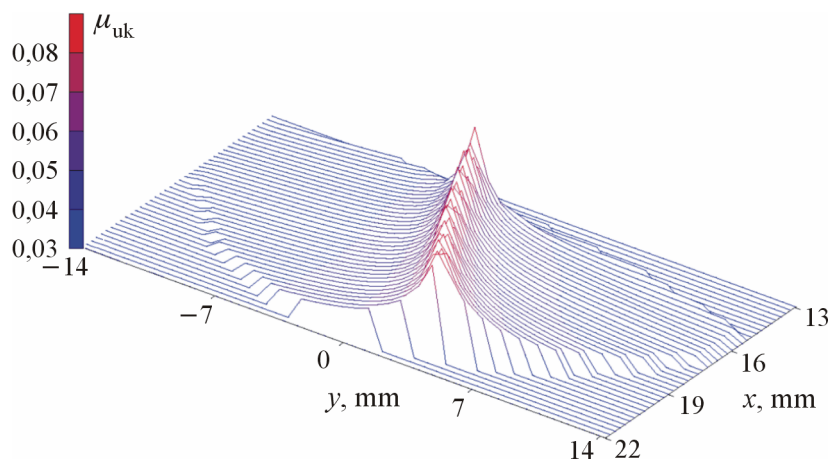
Prepoznavanje utjecaja temperature na uvjete podmazivanja kod visoko opterećenih dodira ključno je za nadogradnju EHD teorije s realnim mazivima te formuliranje termo-elastohidrodinamičke teorije podmazivanja (TEHD). Proračun je u osnovi jednak kao za EHD teoriju uz nužno rješavanje energetske bilance te određivanje svojstava fluida duž područja dodira za ravninski slučaj (npr. dodir po crti cilindra i ravne ploče za slučaj kliznog ležaja pretpostavljeno velike širine), odnosno preko polja dodira (npr. dodir po crti cilindra i ravne ploče za slučaj kliznog ležaja pretpostavljeno male širine). Shematski prikaz općeg proračunskog modela dan je na slici 3.21, a cjelovit postupak s rješenjem za prvi slučaj prikazan je u [15].

⁴ Zaribavanje se u kontekstu pužnih prijenosnika ne navodi kao uobičajeni oblik oštećenja već kao primjer istraživanja podmazivanog dodira s utjecajem temperature. Inače je ovaj oblik oštećenja karakterističan za čelnike i stožnike

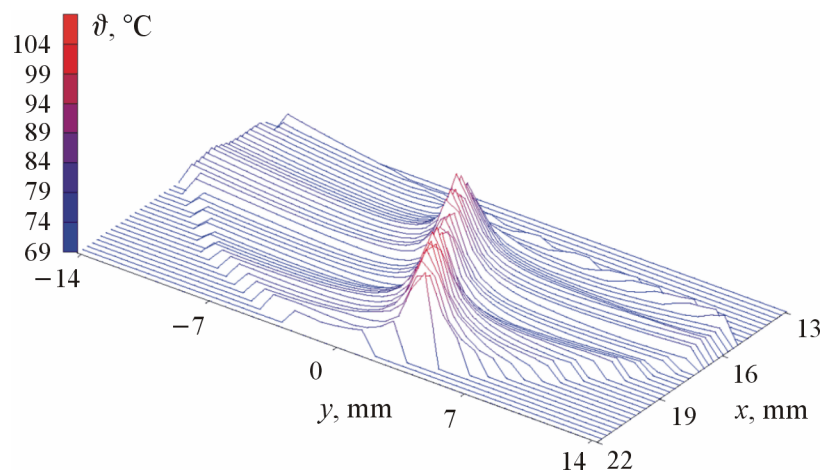


Slika 3.19 Shematska predodžba iteracijskog TEHD modela

TEHD teorija je osobito važna kada je riječ o proračunu pužnih prijenosnika (uobičajeno visoki faktori trenja, visoki gubici te intenzivno oslobađanje topline). Provodi se nad poljem zahvata uzimajući u obzir polumjere zakrivljenosti i sumarne brzine određene prethodno provedenom geometrijskom analizom. Rezultati za N-profil boka prema [25] prikazuju promjenu faktora trenja (slika 3.22) i profil temperature mazivog filma (slika 3.23) u polju zahvata pužnog prijenosnika. Usporedbom s profilom sumarnih brzina u zahvatnom polju (vidi sliku 3.15) može se primijetiti da su faktori trenja i temperature u mazivom filmu najviši upravo na mjestu gdje su brzine najmanje, odnosno gdje su uvjeti za podmazivanje najnepovoljniji.



Slika 3.20 Ukupni faktor trenja u polju zahvata



Slika 3.21 Profil temperature uljnog filma

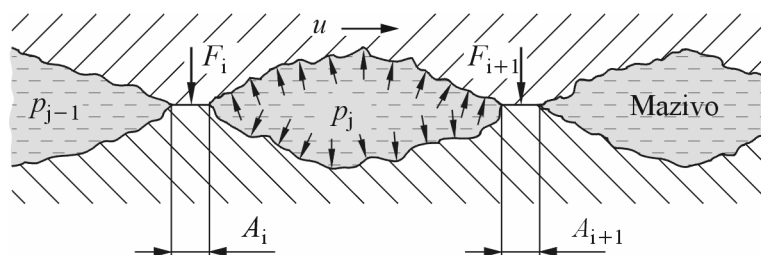
Pored navedenih teorija podmazivanja prisutne su još i teorije graničnog, mješovitog te mikro-elastohidrodinamičkog podmazivanja. Prema [26] potonja je teorija nastala iz potrebe da se u razmatranju režima podmazivanja obuhvati i utjecaj hrapavosti površina, ali ne na način kako je to opisano mješovitim ili graničnim podmazivanjem.

Teorija graničnog podmazivanja ili podmazivanja pri vrlo visokim pritiscima pretpostavlja stvaranje zaštitnih slojeva kojima se ostvaruju niži faktori trenja obzirom na suhi dodir (vidi poglavlje 4.3). Procesi koji se odvijaju u ovakvom režimu rada složene su fizikalno-kemijske prirode, a prema kombinaciji temperature i opterećenja mogu se razvrstati kako je prikazano u tablici 3.5 [26].

Tablica 3.5 Podjela mehanizama podmazivanja kod graničnog podmazivanja

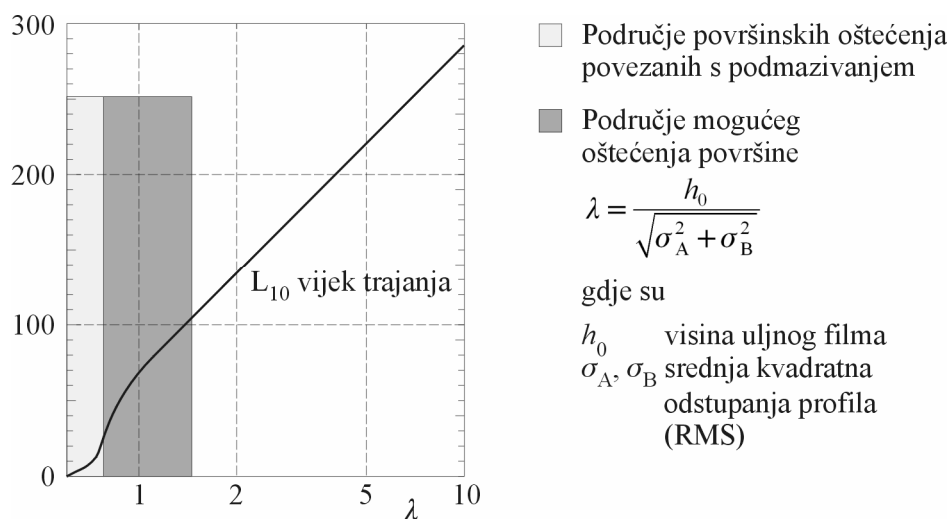
Temperatura	Opterećenje	Mehanizam podmazivanja
Niska	Nisko	Spontano poboljšanje viskoznih svojstava u neposrednoj blizini površine dodira
	Visoko	Smanjenje trenja prekrivanjem dodirnih površina adsorbiranim mono-molekularnim slojem
Visoka	Srednje	Nepovratno stvaranje slojeva sapuna i ostalih viskoznih spojeva na dodirnim površinama uslijed kemijskih reakcija između dodataka u mazivu i metala. Poboljšanje viskoznih svojstava u neposrednoj blizini dodirnih površina zavisno od dodataka i baznog ulja. Formiranje amorfnih slojeva iz dijelova čestica odvojenih tijekom reakcije između dodataka u mazivu i metala.
	Visoko	Reakcija između dodataka u mazivu i metala. Stvaranje neorganskih slojeva na površinama u dodiru te sprječavanje direktnog metalnog dodira i ubrzanog trošenja.

Teorija mješovitog ili djelomičnog EHD podmazivanja se temelji na pretpostavci da se dodirni pritisak dijeli na deformirane neravnine i mazivi film [27] (slika 3.24). Ovdje se uvjeti podmazivanja nalaze između dviju krajnosti: film maziva nije formiran nego se ono nalazi pod pritiskom u udubinama površinskih neravnina i film maziva postoji ali unatoč njegovoj debljini dolazi do dodira između deformiranih neravnina. Dodatna karakteristika ovakvog režima podmazivanja očituje se u neprekidnoj promjeni geometrije dodira i hrapavosti uslijed trošenja površina.



Slika 3.22 Predodžba mješovitog ili djelomičnog EHD podmazivanja

Široko prihvaćenu definiciju omjera debljine filma maziva i neravnina površina u dodiru dao je Tallian [28] (slika 3.25). Mjerenjima je utvrđeno da se navedeni omjer može dovesti u vezu s početkom stvaranja oštećenja površina u dodiru. Brzina napredovanja oštećenja rupičenjem ili trošenja površina izražava se vijekom trajanja predstavljenim brojem izmjena sklizno-kotrljajnih dodira prije nego razmjer oštećenja ne onemogući normalan rad.

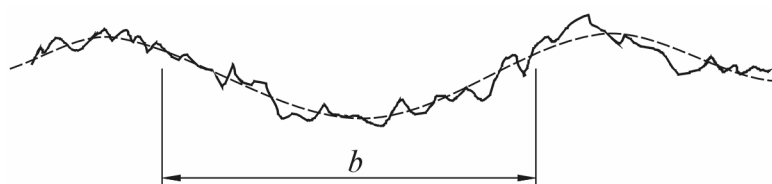


Slika 3.23 Veza između parametra λ i vijeka trajanja obzirom na oštećenja

Za slučaj kada je λ manji od 1 nađeno je da može doći do tečenja površine praćenog s trošenjem. U rasponu od 1 do 1,5 može doći do izraženog uglačavanja i pojave rupičenja, a između 1,5 i 3 samo do umjerenog uglačavanja bez značajnijeg utjecaja na rad te bez pojave rupičenja. Za vrijednosti od 3 do 4 može se očekivati minimalni iznos trošenja bez uglačavanja, a iznad 4 puni EHD režim. Poznato je da veliki broj strojnih elemenata

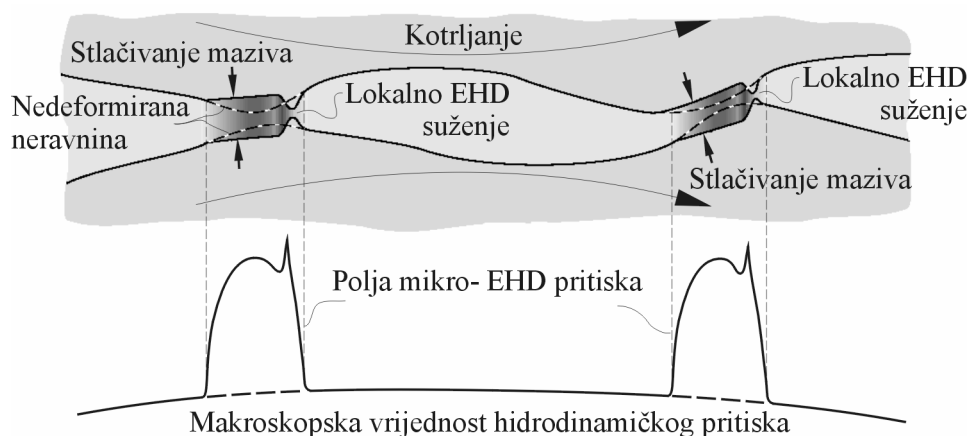
uspješno radi u području vrijednosti $\lambda \approx 1$, dakle gdje je proračunata debljina mazivog filma istog reda veličine kao visina neravnina. Za uspješno bi podmazivanje ovo moralo značiti da je došlo do elastične deformacije vrhova neravnina te da je između njih uspostavljen EHD režim.

Model podmazivanja gdje uvjeti odgovaraju vrijednosti parametra $\lambda \approx 1$ naziva se model mikro-elastohidrodinamičkog podmazivanja. Jedan od koncepta ove teorije predstavljen je u [29], a gdje se pretpostavlja da su površine u dodiru valovite, a duljine valova istog reda veličine kao širina Hertzovog dodira, ali kraće. Dodatno, valovite površine su hrapave, fine teksture još manjih duljina (slika 3.26) te se mogu elastično deformirati pod utjecajem pritiska u dodiru.



Slika 3.24 Tekstura dodirnih površina

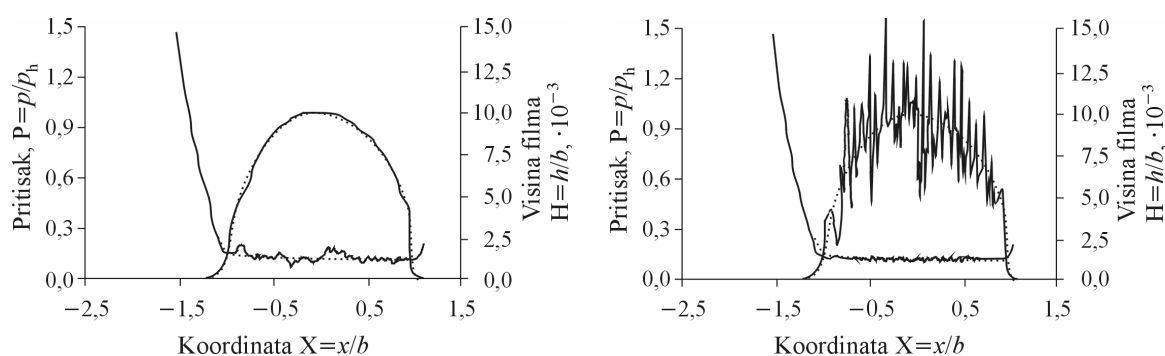
Prema [29] visina neravnina ima velik utjecaj na opterećenje potrebno za plastičnu deformaciju. Naime, manjim neravninama odgovaraju manji polumjeri zakrivljenosti pa će, prema Hertzovoj teoriji, sa smanjenjem polumjera padati i opterećenje potrebno za konstantno dodirno naprezanje. Uz pretpostavku približne proporcionalnosti između duljine valova i polumjera zakrivljenosti neravnine kraće od širine Hertzovog dodira bile bi deformirane elastično, a najmanje neravnine plastično uz mogućnost otkidanja. Slika 3.27 ilustrira pojednostavljeni mehanizam mikro-EHD podmazivanja.



Slika 3.25 Predodžba mikro-EHD mehanizma podmazivanja

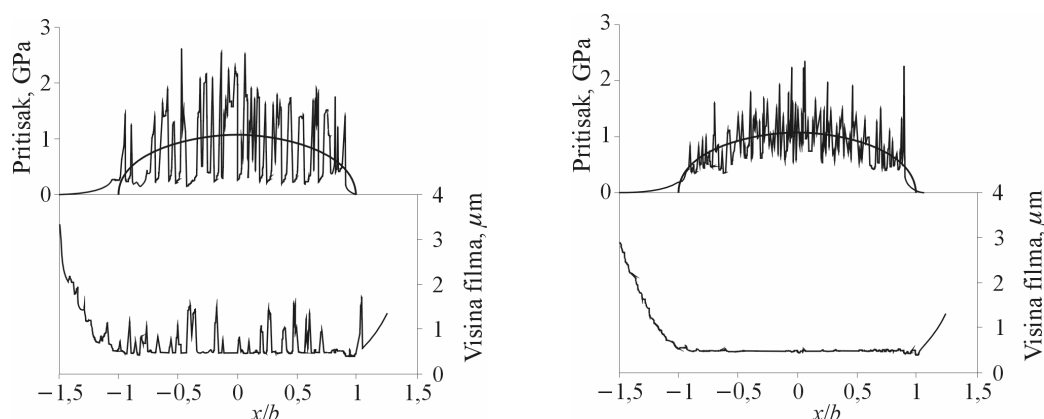
Osim na lokalne pritiske površinska hrapavost može imati utjecaj i kod ulaska u dodir na način da uzrokuje promjenu u količini maziva koja biva uvučena između dviju površina

[30]. U slučaju sklizanja, ovako nastala anomalija putuje kroz područje dodira brzinom koja je različita od brzina samih površina te dodatno utječe na lokalne pritiske. Slika 3.28 [17] prikazuje predviđanje promjene pritiska i debljine uljnog filma za slučajeve kotrljanja i istovremenog sklizanja i kotrljanja. U potonjem se slučaju može primijetiti održanje profila srednjeg pritiska usprkos lokalnih skokova i padova što naglašava važnost razmatranja utjecaja srednjeg pritiska na faktor trenja [31].



Slika 3.26 Predviđeni pritisci i debljine uljnih filmova kod kotrljanja (lijevo) i istovremenog sklizanja i kotrljanja (desno)

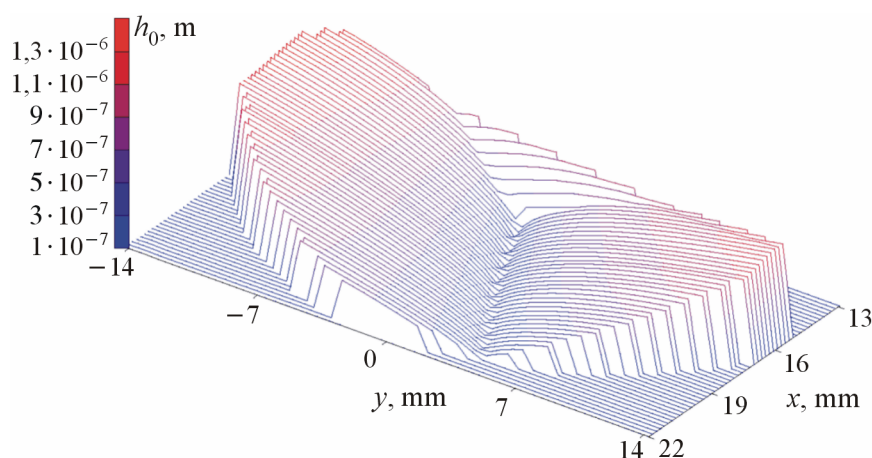
Pored utjecaja relativnog gibanja razmatran je i utjecaj visine neravnina na promjenu pritiska i visinu uljnog filma (slika 3.29) [12]. Za slučaj površine obrađene brušenjem ($Ra=0,1\ldots0,4\text{ }\mu\text{m}$, fino brušeno) vrijednost pritiska ima izražene oscilacije, a odražava se na visinu uljnog filma u obliku lokalnih skokova. S druge strane, kod površina obrađenih superfinišom ($Ra=0,012\ldots0,05\text{ }\mu\text{m}$) oscilacije pritiska su umjerenije, a debljina filma je stabilnija, bez izraženih skokova.



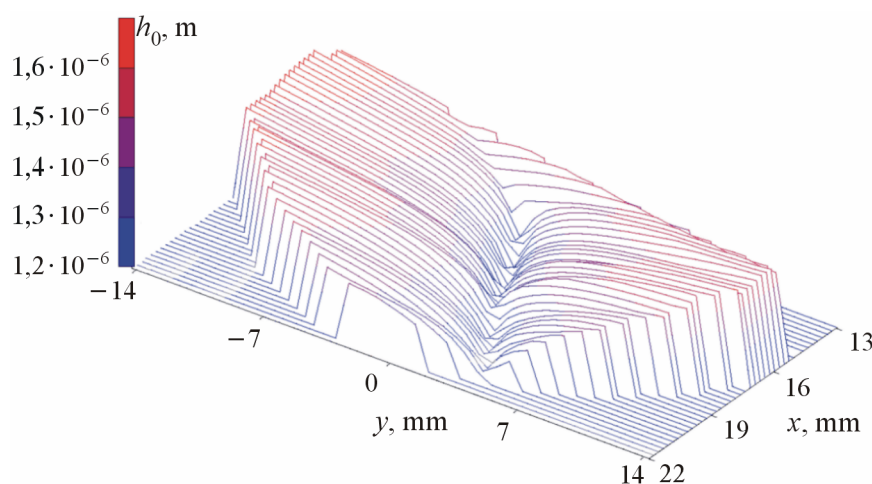
Slika 3.27 Predviđeni utjecaj hrapavosti na profil pritiska i visinu uljnog filma kod brušene površine (lijevo) i površine obrađene superfinišom (desno)

Rezultati proračuna za N-profil boka prema [25] prikazuju promjenu debljine uljnog filma za slučaj idealno glatkih (slika 3.30) i hrapavih površina ($Ra_1+Ra_2=0,6\text{ }\mu\text{m}$, slika 3.31) u pretpostavljenim uvjetima mješovitog podmazivanja. U ulaznom dijelu zahvatnog polja

debljina filma je neznatno veća za slučaj hrapavih površina, dočim je najmanja debljina (u području najmanjih sumarnih brzina, slika 3.15) veća za red veličine.



Slika 3.28 Debljina uljnog filma u zahvatnom polju za glatke površine



Slika 3.29 Debljina uljnog filma u zahvatnom polju za hrapave površine

Prema [4] izmjerena je hrapavost boka zuba pužnog kola (iz materijala AlSn6) nakon uhodavanja iznosila između 3 do 4 μm , a prema [6] hrapavost bokova pužnog vijka trebala bi iznositi 0,5 μm . Jasno je stoga da bi utjecaj hrapavosti realnih površina morao biti uziman u obzir prilikom analize. Za sada se međutim, važećom normom [6] kao i nacrtom nove [7], u obzir uzima samo hrapavost pužnog vijka i to jedino u proračunu gubitaka dok se proračun debljine uljnog filma temelji na pretpostavci idealno glatkih površina.

3.3.2 Proračun gubitaka i iskoristivosti prema DIN 3996

Proračun iskoristivosti prema normi DIN 3996 [6] obuhvaća sljedeće gubitke:

$$\text{praznog hoda, } P_{V0} = 0,89 \cdot 10^{-4} \cdot a \cdot n^{4/3}$$

$$\text{uležištenja, } P_{VLP} = 0,013 \cdot P_2 \cdot a^{0,44} \cdot \frac{u}{d_{m2}}$$

$$\text{brtvljenja, } P_{VD} = 11,78 \cdot 10^{-6} \cdot d_{m1}^2 \cdot n_1$$

$$\text{ozubljenja, } P_{Vz1-2} \approx \frac{0,1 \cdot T_2 \cdot n_1}{u} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{z1-2}} - 1 \right).$$

Očigledno je da su prva tri gubitka svedena na proračunske veličine vezane uz geometriju i uvjete rada te, ovako prikazane, nisu pod utjecajem drugih čimbenika⁵. Primjenom navedenih izraza za uvjete ispitivanog prijenosnika utvrđena je sljedeća struktura gubitaka:

	70 Nm	95 Nm
ozubljenje	≈58,2%	≈62,8%
prazni hod	≈34,2%	≈30,0%
brtvljenje	≈5,8%	≈5,0%
uležištenje	≈1,8%	≈2,2%

Udio gubitaka praznog hoda je velik iz razloga što je opterećenje relativno malo (vrijednosti proračunatog gubitka odgovaraju prema redu veličine utvrđenima u [4]), a pokazuje trend pada s rastom opterećenja. Budući da su gubici brtvljenja i praznog hoda svedeni na zavisnost o geometriji i brzini vrtnje njihov utjecaj pada kako raste snaga na izlaznom vratilu. S druge strane, gubici uležištenja i ozubljenja rastu.

3.3.2.1 Iskoristivost ozubljenja

Iskoristivost ozubljenja u direktnoj je svezi s geometrijom pužnog para (vidi poglavlje 2) te faktorom trenja. Utvrđivanje faktora trenja za razne uvjete dodira tema je brojnih radova. Često se vrijednosti određuju modelnim ispitivanjima za simulirane uvjete (npr. [4], [25]), a zatim primjenjuju kao proračunske veličine. No, kod pužnih je prijenosnika ovo naročito složena zadaća. Budući da se uvjeti dodira neprekidno mijenjanju, faktor trenja poprima različite vrijednosti diljem zahvatnog polja (slika 3.22). Za potrebe proračuna iskoristivosti pužnog para važeća norma iskazuje faktor trenja kao srednju vrijednost određenu izrazom:

$$\mu_{zm} = \mu_{0T} \cdot Y_S \cdot Y_G \cdot Y_W \cdot Y_R. \quad 3.53$$

⁵ Poznata je zavisnost gubitaka praznog hoda o brzini vrtnje i temperaturi.

Prva veličina u izrazu je temeljni faktor trenja (izraz 3.54), a formuliran je u zavisnosti od materijala pužnog kola, brzine klizanja na srednjem promjeru puža (izraz 5.21), vrste ulja te načina podmazivanja. Vrijednosti parametara (izraz 3.54) od A do E za ponuđene kombinacije čimbenika prikazane su u tablici 3.6.

$$\mu_{0T} = A + B \cdot \frac{1}{(v_g + C)^D} \leq E. \quad 3.54$$

Tablica 3.6 Parametri za izračun temeljnog faktora trenja

Materijal	Podmazivanje	Ulje	A	B	C	D	E
legura bakra	prskanjem	mineralno	0,028	0,026	0,17	0,76	0,1
legura bakra	prskanjem	polialfaolefin	0,026	0,017	0,17	0,92	0,096
legura bakra	prskanjem	poliglikol	0,02	0,02	0,2	0,97	0,094
legura bakra	uranjanjem	mineralno	0,033	0,079	0,2	1,55	0,1
legura bakra	uranjanjem	polialfaolefin	0,027	0,0056	0,15	1,63	0,096
legura bakra	uranjanjem	poliglikol	0,024	0,0032	0,1	1,71	0,094
sivi lijev		mineralno ili polialfaolefin	0,055	0,015	0,2	0,87	0,1
sivi lijev		poliglikol			0,19	0,97	0,1

Tri od preostala četiri parametra u izrazu za srednji faktor trenja su:

$$\text{parametar veličine, } Y_s = \sqrt{\frac{100}{a}},$$

$$\text{parametar geometrije } Y_G = \sqrt{\frac{0,07}{h^*}} \text{ i}$$

$$\text{parametar hrapavosti } Y_R = \sqrt[4]{\frac{Ra_1}{0,5}}.$$

Za parametar materijala Y_w nema podataka za AlSn6, a za kolo načinjeno iz CuSn12 vrijednost iznosi 1. No, kako navedeni parametar utječe na faktor trenja, jasno je da će materijalima boljih kliznih svojstava pripadati niže vrijednosti. Tako na primjer materijal CuSn12Ni2 (tablica 4.2) ima udio kositra istog reda veličine kao i CuSn12, ali je udio olova značajno viši obzirom na preostale. Budući da je olovo adhezijski kompatibilno s željezom (najslabija adhezija) [16] utječe na poboljšanje kliznih svojstava legure pa faktor materijala iznosi 0,95. Na temelju modelnog usporednog ispitivanja materijala CuSn12 i AlSn6 (slika 4.2) može se zaključiti da bi vrijednost ovog parametra za materijal AlSn6

mogla biti veća od 1 poradi dobivenih viših vrijednosti koeficijenata trenja pri brzini klizanja od 2.8 ms^{-1} .

Prema izrazu 3.53 srednji faktori trenja za dva ispitivana materijala (uz pretpostavljenu vrijednost faktora materijala $Y_W=1,1$ za pužno kolo AlSn6) iznosili bi 0,055 za CuSn12 i 0,06 za AlSn6. Vrijednost bezdimenzijskog parametra h^* u parametru geometrije određena je na temelju izraza 5.14, a hrapavost je uzeta prema [4].

Pretpostavljeni proračunski stupanj djelovanja, odnosno iskoristivost ozubljenja određuje se pomoću izraza

$$\eta_{z1-2} = \frac{\tan \gamma_{m1}}{\tan(\gamma_{m1} + \arctan \mu_{zm})}, \quad 3.55$$

a za navedene uvjete iznosili bi približno 0,716 za materijal AlSn6 i 0,736 za materijal CuSn12. Rezultati praćenja stupnja korisnog djelovanja za oba slučaja, posredno utvrđena mjerenjem zakretnog momenta na ulaznom i izlaznom vratilu, prikazani su u 10. poglavlju.

U dosadašnjim su istraživanjima praktično i teoretski razmatrani slučajevi za razne kombinacije čimbenika u dodiru:

- statički i dinamički,
- različiti režimi rada,
- različiti spregnuti materijali,
- idealno kruta i deformabilna tijela,
- spektar opterećenja do 3 GPa,
- čisto sklizanje ili kotrljanje, različiti omjeri sklizanje-kotrljanje, protusmjerno i istosmjerno,
- različita maziva,
- različiti modeli maziva (odnos smičnog naprezanja i brzine smične deformacije),
- različiti oblici površina u dodiru,
- idealno glatke i hrapave površine,
- ravne i valovite površine te različiti smjerovi prostiranja valovitosti,
- sekundarna strujanja,
- utjecaj temperature, itd.

Iz navedenog se može zaključiti da sigurna pogonska funkcija stroja i njegov radni vijek ovise o konstruiranju i dimenzioniranju njegovih dijelova u dodiru s obzirom na trošenje. To se, između ostalog, postiže i tako da se kod određenog opterećenja i određene relativne brzine klizanja, te dopuštene temperature, spriječi neposredni dodir metala po metalu (tzv. *suhi dodir*). Dodir mora biti ostvaren posredno preko tankog mazivog sloja tzv. *mazivog filma*. Dakle, kada su dva strojna dijela u relativnom gibanju tlačno opterećena silom, uporabom tankog mazivog filma sprječava se neposredni dodir njihovih radnih površina.

Opiranje gibanju strojnog dijela koje relativno kliže u odnosu na drugi strojni dio dovodi do gubitka (rasipanja) kinetičke energije i može prouzročiti oštećenja njihovih radnih površina. Zagrijavanje uslijed trenja, koje može prouzročiti zapaljenje maziva, predstavlja vjerojatno najdulje poznatu negativno ocijenjenu pojavu rasipanja kinetičke energije.

Dakle, stvarna učinkovitost podmazivanja je što posrednim dodirrom radnih površina svodi mogućnost oštećenja i gubitak energije na minimum te stoga predstavlja vitalni element u oblikovanju, konstruiranju i dimenzioniranju strojnih sustava.

MATERIJALI I MAZIVA

U radu pužnog para dominantan utjecaj ima klizno gibanje. Uobičajena je praksa, u cilju izbjegavanja zaribavanja između površina u kontaktu, odabrati kombinaciju tvrdog i mekog materijala. Tvrdi je komponenta u pravilu puž, a mekana pužno kolo. Neizbježna je posljedica ovakvog odabira puno viši stupanj trošenja pužnog kola u odnosu prema pužu.

4.1 Materijal puža

Pužni je vijak izrađen iz čelika za cementiranje Č 4320 (16MnCr5), plameno kaljen i brušen kako bi se postigla visoka tvrdoća te mala hrapavost površine.

Tablica 4.1 Podaci o sastavu materijala i obradi pužnog vijka

Mehaničke osobine		Kemijski sastav	%
Vlačna čvrstoća, N/mm ²	800...1100	C	0,16
Granica razvlačenja, N/mm ²	600	Mn	1,15
Tvrdoća (žareno)	HB 207	Cr	0,95
Relativna istezljivost A ₅ , %	10		
Dubina cementiranja, mm	0,5		
Tvrdoća nakon plamenog kaljenja i brušenja	HRC 59±2		

4.2 Materijal pužnog kola

Obzirom na slične uvjete u kojima rade klizni ležajevi i pužni parovi, materijal pužnog kola treba zadovoljavati slične zahtjeve. Primjena određenog materijala zavisi i od režima u kojem je predviđen rad prijenosnika. Tako se za niska opterećenja, male obodne brzine i intermitirajući pogon može rabiti perlitni sivi lijev. Za niska opterećenja može se rabiti kositrena bronca s 8% udjela kositra (Sn), za srednja opterećenja kositrena bronca s 12% udjela Sn, lijevana u pijesku i centrifugirana, a za viša opterećenja kositrena bronca s 14% udjela Sn, također lijevana u pijesku i centrifugirana. Namjesto kositrenih bronci rabe se i

aluminijske bronce, lijevane u pijesku ili kovane. Za visoko opterećena pužna kola rabe se centrifugirane ili kovane aluminijske bronce legirane manganom, niklom i željezom. Rezultate opsežnih ispitivanja s materijalima navedenim u kolonama 1-7 prikazanim u tablici 4.2 objavio je 1978.g. Huber [2], a s materijalom u 8. koloni 1980.g. Opalić [3]. Pored navedenih koriste se još i cinkove i magnezijske legure te plastične mase.

Tablica 4.2 Svojstva nekih materijala koji se koriste za izradu pužnih kola

Kemijski sastav, %	1 CuSn12	2 CuSn12Ni	3 CuSn14	4 CuAl10Ni	5 CuAl11Ni	6 NL70	7 NL25	8 AlSn
Cu	87,6	85	85,12	80,29	56,93	-	-	2,2
Pb	0,1	0,8	0,1	0,05	0,74	-	-	-
Sn	11,28	11,5	13,69	0,1	0,1	-	-	6,27
Fe	0,1	0,05	0,1	4,34	0,1	93,39	93,49	-
Al	0,01	-	0,05	9,83	0,1	-	-	89,28
Ni	0,73	2,7	0,71	4,75	2,06	-	-	1,4
Si	0,1	0,1	0,1	0,1	0,91	2,58	2,77	-
P	-	-	-	-	-	0,01	0,15	-
Mg	-	-	-	-	-	-	-	0,85
Mn	0,1	0,1	0,1	0,13	2,15	0,29	0,73	
Zn	0,1	0,2	0,1	0,17	36,56	-	-	
C	-	-	-	-	-	3,73	2,86	
$R_{p0,2}$, N/mm ²	207	248	246	371	260	500	-	120
R_m , N/mm ²	330	341	298	746	416	791	300	150
$E \cdot 10^3$, N/mm ²	88,3	98,1	92,7	122,6	107,9	175	98,1	100
A_5 , %	10	9	4	17	11	5,5	-	-
HB	100	106	115	202	118	260	255	71
ρ , kg/m ³ · 10 ⁻³	8,8	8,8	8,9	7,4	8,3	7,2	7,35	2,84

Unatoč činjenici da je područje prijenosnika s pužnim parovima predmet neprekidnog zanimanja proizvođača i znanstvenika te da se u praksi koriste zupčanici načinjeni od različitih metala i plastičnih masa, aktualna norma [6], kao i nacrt nove [7] u proračunu opteretivosti obuhvaćaju samo mali broj kombinacija (tablica 4.3) oslanjajući se pri tome

na dosadašnja iskustva i istraživanja. Razlog tome leži u relativno malom broju cjelovitih istraživačkih radova s odgovarajućim kombinacijama značajki.

Tablica 4.3 Kombinacije materijala puž/pužno kolo u dosadašnjim istraživanjima

Materijal puža	Č 4320 (DIN 16MnCr5)					
Materijal kola	GZ-CuSn12 ¹⁾	GZ-CuSn12Ni2 ¹⁾	GC-CuSn12Ni2 ¹⁾	GZ-CuAl10Ni ¹⁾	GGG-40	GG-25
Trošenje	+	+	+	o	o	O
Rupičenje	+	+	+	o	–	–
Lom zuba	+	+	–	+	+	+
Temperatura	+	+	+	+	–	–

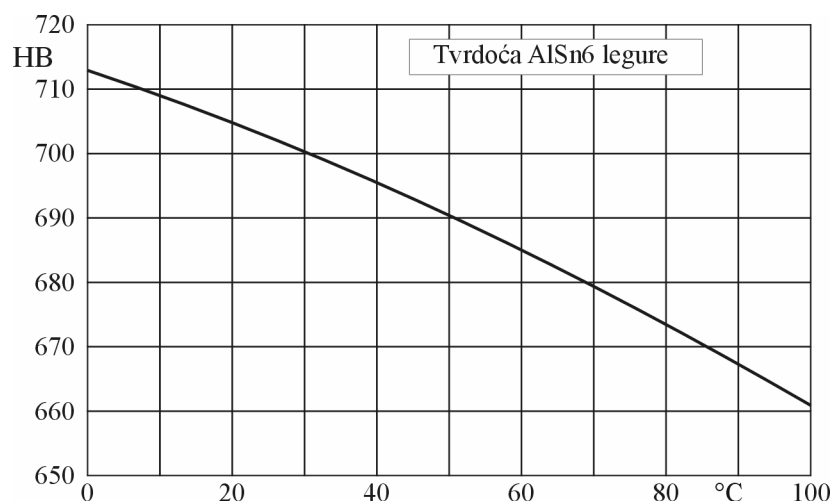
+: studija iz područja na raspolaganju

o: poznata studija

–: iskustvene vrijednosti

1) Bronca treba biti homogena i bez usahlina u području ozubljenja. Prosječna zrnatost $<150 \mu\text{m}$. Varijacija u veličini zrna (obzirom na navedenu) može imati značajan utjecaj na nosivost s odstupanjima od 20% ili više. Za utvrđivanje veličine zrna najmanje 50% od ukupnog broja mora biti iz područja aktivnih zuba

Materijal jednog od pužnih kola rabljenih u ovom istraživanju (tablica 4.2, kolona 8) bio je predmet opsežnih istraživanja [3, 4] kao mogući materijal za tu svrhu. Slike 4.1, 4.2 i 4.3 te tablica 4.4 prikazuju pojedine osobine materijala i usporedne vrijednosti važne za ocjenu primjene u pužnim prijenosnicima.

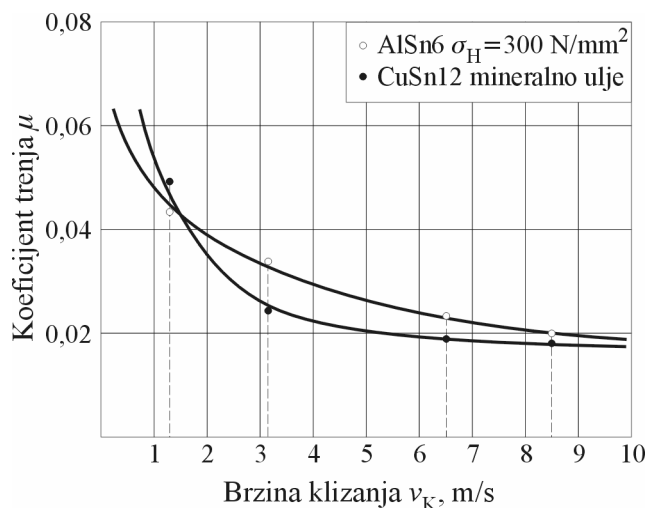


Slika 4.1 Zavisnost tvrdoće AlSn6 o temperaturi materijala

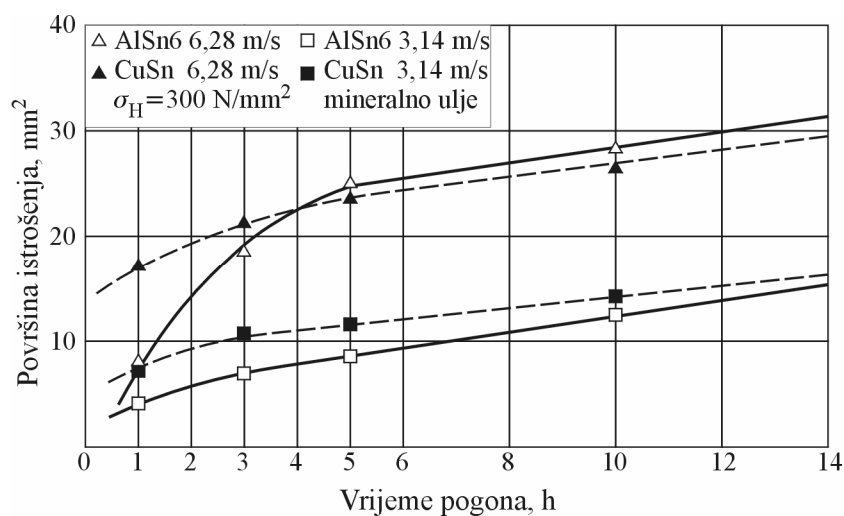
Tablica 4.4 Zavisnost vlačne čvrstoće o temperaturi

Temperatura, °C	20	85	150
Prekidna čvrstoća, N/mm ²	14,6	13,3	13

Utjecaj temperature na navedene veličine naročito je značajan kod pužnih prijenosnika zbog loših toplinskih uvjeta induciranih pretežito kliznim gibanjem. Ovdje treba imati na umu da prosječna temperatura ulja u prijenosniku ne predstavlja i trenutnu temperaturu na mjestu kontakta.



Slika 4.2 Usporedba faktora trenja o brzini klizanja za CuSn12 i AlSn6



Slika 4.3 Usporedba površine istrošenja o vremenu pogona za CuSn12 i AlSn6

Za navedeni materijal je pokazano da bolja svojstva, obzirom na trenje, pokazuje pri brzinama klizanja do otprilike $1,5 \text{ ms}^{-1}$. Obzirom na trošenje, vidljiv je trend rasta udjela površine i za relativno kratko vrijeme praćenja. Navedeni materijal je stoga moguće primijeniti za izradu pužnih kola s ograničenjem brzine klizanja i trajanjem pogona [4].

4.3 MAZIVA

Podmazivanje je jedna od najvažnijih komponenti u tribološkom lancu podmazivanje-trenje-materijal, a kod pužnih je prijenosnika ona posebno naglašena [32]. Zbog velikog udjela klizanja gubici su veći nego što je slučaj kod čelnika ili stožnika, posebno s porastom prijenosnog omjera, pa rad prijenosnika, zavisno od uvjeta, može pratiti znatno zagrijavanje. Pored toga, pužni su prijenosnici kompaktne konstrukcije, s velikim omjerom prenesene snage po jedinici volumena. Možebitni nepovoljan odnos rashladne površine i volumena često se rješava dodatnim površinama (orebrenjima) ili, ako takvo konstrukcijsko rješenje nije moguće, prisilnim hlađenjem (ventilatorima na vratilu puža, vanjskim ventilatorima). Kod obodnih brzina manjih od 0,8 m/s i kratkotrajnih pogona pužne je prijenosnike moguće podmazivati mašću, a u zahtjevnijim se uvjetima najčešće koriste maziva ulja (u daljnjem tekstu ulja).

4.3.1 Općenito o mazivima

Podmazivanje kakvo poznajemo temelji se na dva principa:

- razdvajanju površina u dodiru pritiskom u uljnom filmu i
- stvaranju površinskog zaštitnog sloja temeljenog na kemijskim procesima.

Istraživanja do polovine prošlog stoljeća pokazala su da čak i monomolekularni površinski sloj može pružiti kratkotrajno smanjenje faktora trenja te da se trajnija zaštita može postići jedino debljim, višestrukim slojevima [33]. Analizom zahtijeva koji se postavljaju na površinski sloj (elastičnost, dobra prionjivost na površinu, sposobnost samooporavka itd.), došlo se do zaključka da su neki od njih oprečni (sposobnost samooporavka, da se molekule samostalno preraspodjele po površini nakon mehaničkog poremećaja izazvanog dodiranjem, implicira mogućnost gibanja molekula na površini što je u suprotnosti s zahtjevom za čvrstu adhezivnu vezu molekule s površinom). Sloj bi se, prema tome, trebao sastojati iz najmanje dvije faze: prve, koja bi ostvarivala čvrstu vezu s površinom, i druge, koja bi mogla slobodno gibati iznad površine. Pokazalo se da je uporabom naprednih tehnika molekularnog inženjerstva moguće ispuniti tražene zahtjeve u laboratorijskim uvjetima, a djelomično i u praksi. Navedene zahtjeve jednim dijelom ispunjava dodatak naziva ZDDP (*zinc dialkyl-dithiophosphate*) koji površinskom sloju, u kombinaciji s osnovnim uljem, daje multifunkcionalnost i sposobnost samoorganiziranja u smislu različitog djelovanja u periodu uhodavanja i periodu normalnog trošenja [34].

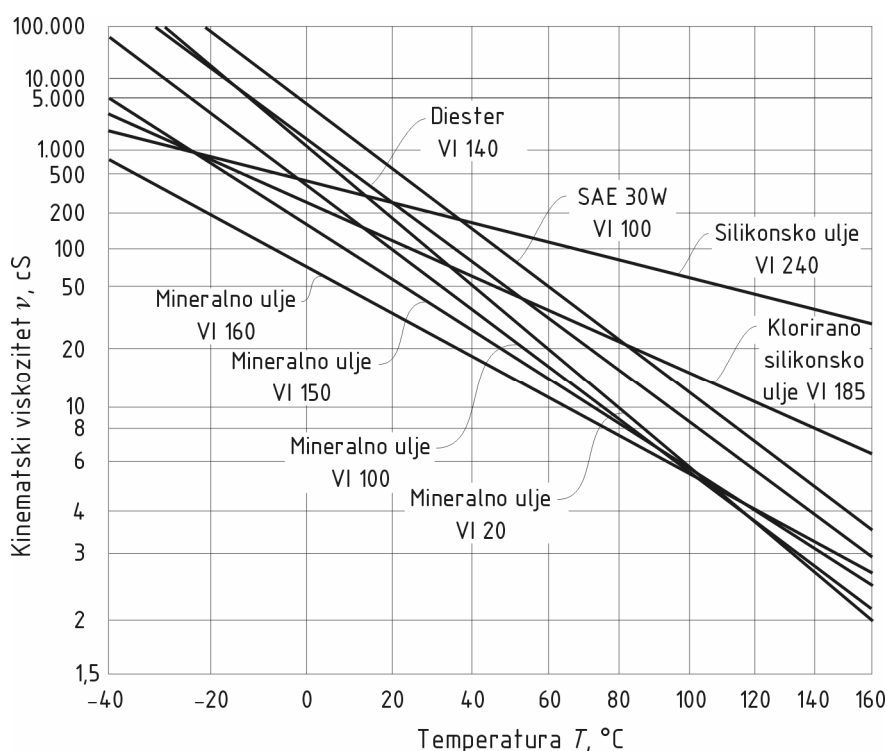
Premda je struktura površinskog sloja načelno poznata, njegova priroda i kemijski procesi koji prate nastanak i djelovanje nisu u potpunosti razjašnjeni. Jasno je međutim da veću ili manju ulogu imaju svi elementi sustava uključujući i uvjete rada. Moderna su ulja mineralnih ili sintetskih baza te biljnog porijekla, s dodacima za poboljšavanje svojstava (rad pri visokim pritiscima, protiv starenja i emulzivnosti prema vlazi; inhibiciju

oksidacije, korozije, kemijskog trošenja bakra i bakrenih slitina itd.). Miješanjem čistog mineralnog (baznog) ulja s masnim kiselinama postižu se povoljnija svojstva podmazivanja. Masne kiseline kemijski reagiraju s metalnim površinama tvoreći tzv. metalne sapune koji pojačavaju prionjivost maziva te snižavaju faktor trenja u području graničnog ili mješovitog trenja. Pri dostizanju temperature tališta metalnih sapuna ova se svojstva gube. Dodaci za rad pri visokim pritiscima (EP-*extreme pressure*) kemijski reagiraju s metalnim površinama stvarajući lako taljive eutektike na mjestima izbočina gdje bi inače došlo do mikrozavarivanja. Budući da izostaje otpor raskidanju adhezijskih veza smanjuje se faktor trenja, ali istovremeno raste iznos trošenja. Kemijska reakcija dodataka i metala počinje kada se u dodiru dosegne temperatura reakcije, zavisna o kombinaciji sastojaka dodatka [16].

Općenito su za izbor ulja važne tri veličine: temperatura, pritisak i brzina klizanja.

4.3.1.1 Utjecaj temperature

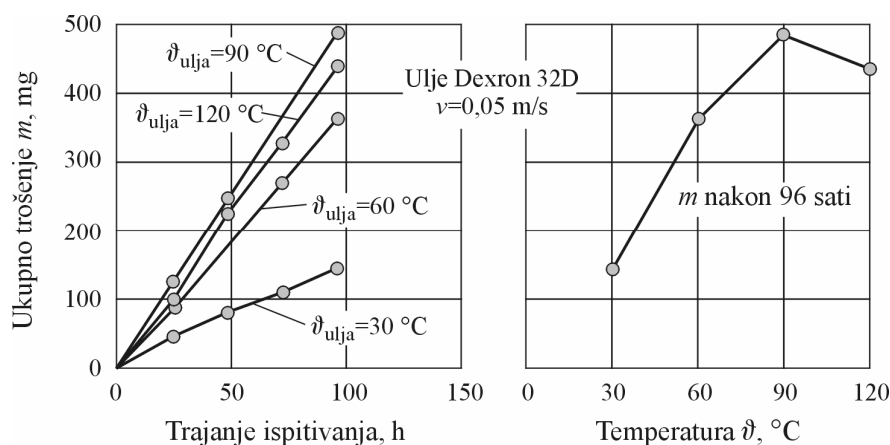
Utjecaj temperature na ulje očituje se, u većoj ili manjoj mjeri, kroz pad viskoziteta [26] (slika 4.4). U području mješovitog trenja ova pojava može prouzročiti porast faktora trenja i pojačanu kemijsku aktivnost u uljnom filmu, dok u području fluidnog trenja iznos faktora trenja može sniziti.



Slika 4.4 Usporedba zavisnosti viskoziteta o temperaturi za različite vrste ulja

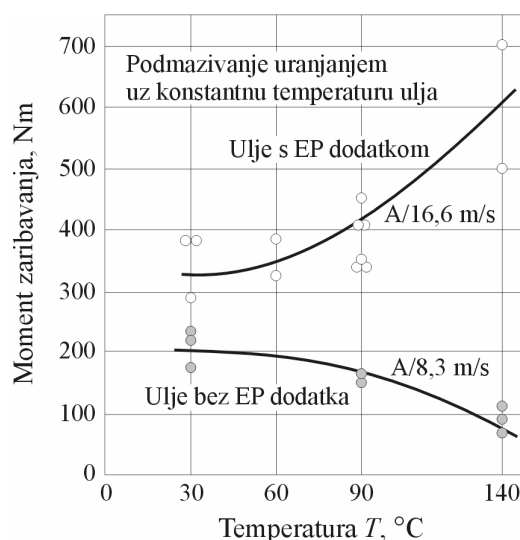
Utjecaj temperature na ulje istražuje se između ostaloga i praćenjem promjena intenziteta trošenja, poglavito adhezivnog, zaribavanja, mikro rupičenja i rupičenja. Slika 4.5

prikazuje rezultat ispitivanja adhezivnog trošenja uz podmazivanje uljem za automatske prijenosnike u motornim vozilima [35]. Očigledan je porast trošenja uz porast temperature ulja izuzev na temperaturi ulja od 120 °C. Ovaj se rezultat tumači utjecajem EP dodatka u ulju i intenzivnijih kemijskih reakcija u uljnom filmu kad se postigne temperatura aktivacije.



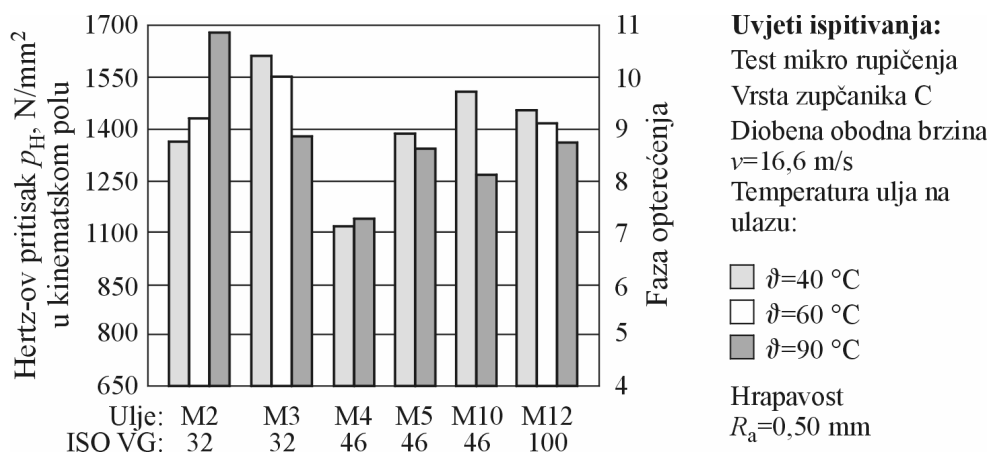
Slika 4.5 Utjecaj temperature ulja na iznos ukupnog trošenja

Istraživanje utjecaja temperature na moment kod kojeg nastupa zaribavanje [35] prikazan je na slici 4.6. Rezultati za mineralno ulje bez EP dodataka pokazuju stalni trend pada otpornosti na zaribavanje već od 60°C, a za dvostruko veću temperaturu moment kod kojeg nastupa zaribavanje je približno dvostruko manji. Budući da ulje nema EP dodataka smatra se da je navedeni rezultat direktna posljedica pada viskoziteta s porastom temperature. Nasuprot tome, za ulje s EP dodatkom moment zaribavanja ima stalni trend rasta već od 40°C, a kod temperature od 140°C poprima gotovo dvostruko veću vrijednost. Proizlazi da EP dodaci nadomještaju pad viskoziteta s porastom temperature, a obzirom na vrijednosti pri 30°C i općenito povoljno djeluju na karakteristike ulja obzirom na zaribavanje.



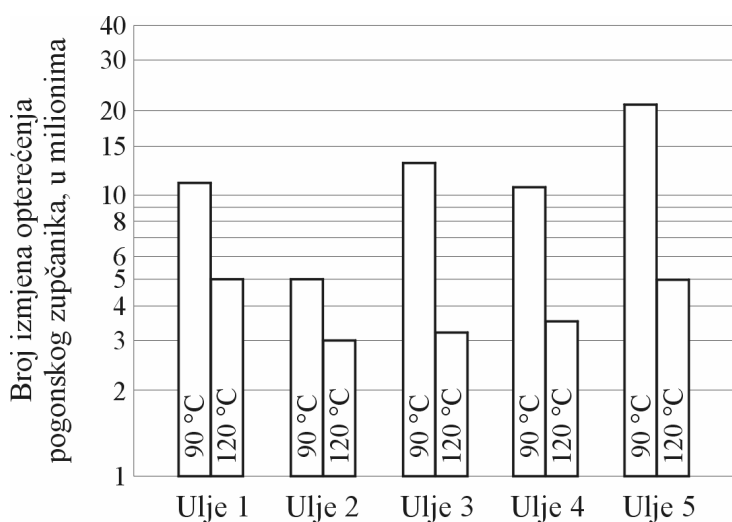
Slika 4.6 Utjecaj temperature ulja na otpornost prema zaribavanju

Poznato je da pri istoj temperaturi ulja višeg viskoziteta pružaju veću otpornost mikro rupičenju i rupičenju. U ispitivanju mikro rupičenja [35] (FZG test C-GF/8,3/θ_{ulja}) pokazao se kod većine različitih ispitivanih ulja (slika 4.7) trend pada otpornosti na mikro rupičenje s porastom temperature (više vrijednosti pritiska naznačuju veću otpornost prema mikro rupičenju).



Slika 4.7 Utjecaj temperature ulja na otpornost prema mikro rupičenju

Rezultati ispitivanja [35] (FZG test C-PT/10/θ_{ulja}) provedenog na pet komercijalnih ulja različitih viskoziteta i dodataka za dvije različite temperature ukazuju na promjenu broja ciklusa opterećenja prije pojave rupičenja (slika 4.8) kod svih ulja s rasponom pada broja ciklusa od 1,7 do 4 puta.



Slika 4.8 Utjecaj temperature ulja na broj ciklusa prije pojave rupičenja

Rezultati prikazuju utjecaj temperature na karakteristike ulja te pojedine navedene oblike trošenja. Isto tako vidljiv je i utjecaj pojedinih dodataka uljima na otpornost prema navedenim vrstama trošenja. Važno je primijetiti velike razlike u rasponima radnih

karakteristika za pojedine vrste ulja pri normalnim, srednjim i visokim temperaturama (definicije područja radnih temperatura prema [36] vidjeti u tablici 4.5). Razlog leži u činjenici da su pojedina ispitivana ulja konstruirana za određena radna područja te van njih imaju značajan gubitak svojstava, bilo da je riječ o previsokim, odnosno o nižim radnim temperaturama gdje kvaliteta ulja i možebitni dodaci ne mogu doći do izražaja. S druge strane, može se postaviti pitanje ekonomske opravdanosti izbora kvalitetnih, ali i skupih ulja, za manje zahtjevne uvjete rada.

Tablica 4.5 Definicija uvjeta rada glede temperature, opterećenja i brzine klizanja

Temperatura	Režim	Opterećenje	Režim
$t < -34\text{ }^{\circ}\text{C}$	Jako niska	Dodirni pritisak načelno ispod 500 N/mm^2 , a brzina klizanja na površini zuba načelno manja od $1/3$ obodne brzine na diobenom promjeru	Nisko opterećenje
$-34 < t < -16\text{ }^{\circ}\text{C}$	Niska		
$-16 < t < 70\text{ }^{\circ}\text{C}$	Normalna		
$70 < t < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	Srednja	Dodirni pritisak načelno iznad 500 N/mm^2 , a brzina klizanja na površini zuba možebitno veća od $1/3$ obodne brzine na diobenom promjeru	Visoko opterećenje
$100 < t < 120\text{ }^{\circ}\text{C}$	Visoka		
$t > 120\text{ }^{\circ}\text{C}$	Jako visoka		

Ulja za zupčaničke prijenosnike trebaju prema [36] zadovoljavati propisane kriterije u zavisnosti od uvjeta rada (tablica 4.5), poglavito vezano uz dodatke protiv oksidacije i pjenjenja te korozivnosti prema obojenim metalima (tablica 4.6).

Tablica 4.6 Preporuka za sastav ulja obzirom na uvjete rada, izvadak

Preporuka	Oznaka po ISO-L	Režim
Rafinirana mineralna ulja, oksidacijski stabilna, antikorozivna prema čelicima i obojenim metalima s dodacima protiv pjenjenja	CKB	Kontinuirano podmazivanje uranjanjem ili špricanjem uz niska opterećenja i normalne temperature
CKB + poboljšana EP svojstva i protiv starenja	CKC	Normalne ili srednje stabilne temperature i visoka opterećenja

4.3.1.2 Utjecaj pritiska

Utjecaj pritiska na viskozitet ulja prvi je formulirao Barus početkom devedesetih godina 19. stoljeća uvođenjem tlačno-viskozitetnog koeficijenta α^6 [37]. 1960. godine Smith je, na temelju provedenih eksperimenata, pretpostavio da mazivo u području koncentriranog dodira i pod visokim pritiskom pokazuje osobine čvrstog tijela, odnosno da dolazi do solidifikacije [31]. Pored Barus-ovog, uspješan i prihvaćen model zavisnosti viskoziteta o pritisku i temperaturi objavio je Roelands 1966 godine [38] analitičkim izrazom za tlačno-viskozitetni koeficijent. Potonji je, premda ograničenog područja primjene, uspješniji od ostalih modela budući da istovremeno objedinjuje utjecaje pritiska i temperature.

Tablica 4.7 Barus-ova (1) i Roelands-ova (2) formulacija zavisnosti viskoziteta o pritisku i temperaturi

	Model	Područje primjene
1	$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p)^7,$ <p>gdje je α, m²/N, tlačno-viskozitetni koeficijent, nagib tangente na krivulju zavisnosti dinamičkog viskoziteta o pritisku u obliku $\ln(\eta)$-p.</p>	<500 MPa
2	$\eta = \eta_0 \exp(\alpha^* p),$ $\alpha^* p = [\ln(\eta_0) + 9,67] \left\{ \left(\frac{T - 138}{T_0 - 138} \right)^{-S_0} \cdot (1 + 5,1 \cdot 10^{-9} p)^Z - 1 \right\}$ <p>uz</p> $Z = \frac{\alpha}{5,1 \cdot 10^{-9} (\ln \eta_0 + 9,67)}$ $S_0 = \frac{\beta(T_0 - 138)}{\ln \eta_0 + 9,67}$ $\beta = (\ln \eta_0 + 9,67)(1 + 5,1 \cdot 10^{-9} p)^Z \left[\frac{S_0}{T_0 - 138} \right]$ <p>Z i S_0 su konstante za odabrano ulje i ne zavise o temperaturi i pritisku, a β je pomoćni koeficijent.</p>	<1 GPa

⁶ U literaturi se koeficijent α uobičajeno naziva tlačno- viskozitetnim koeficijentom (*pressure-viscosity coefficient*) premda je nekima od izraza istovremeno obuhvaćen i utjecaj temperature

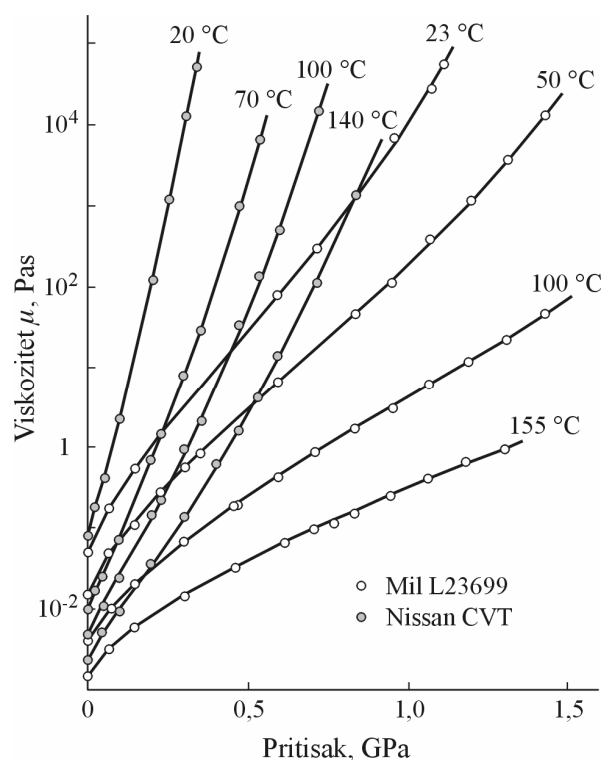
⁷ $\exp(x)$ je uobičajeni način zapisa funkcije e^x

Tlačno-viskozitetni koeficijent je funkcija molekularne strukture i fizikalnih osobina ulja (međumolekularnih veza, slaganja molekula, zavisnosti viskoziteta o temperaturi itd.) [26]. Veličina koeficijenta utvrđuje se posredno, viskometrima za različite iznose pritiska i temperature. U tablici 4.8 dane su vrijednosti za nekoliko mineralnih i sintetskih te dva biljna ulja kod atmosferskog pritiska [37].

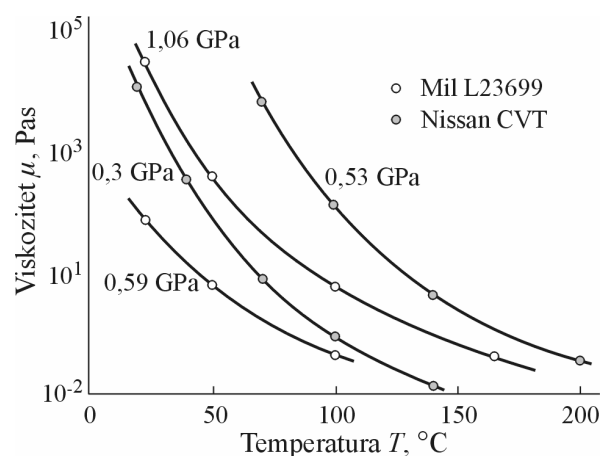
Tablica 4.8 A – tlačno-viskozitetni koeficijent α (GPa⁻¹)
i B – faktor graničnog smičnog naprezanja γ

Ulje		20°C		40°C		60°C		80°C	
		A	B	A	B	A	B	A	B
1	Cikloparafinsko mineralno	26,5	0,0534	23,4	0,0520	20,0	0,0511	16,4	0,0501
2	Mješavina 50:50 cikloparafinskog i parafinskog mineralnog ulja	23,0	0,0506	20,8	0,0488	18,5	0,0481	16,1	0,0471
3	Parafinsko mineralno ulje	19,8	0,0460	18,2	0,0445	16,6	0,0432	15,0	0,0422
4	Repino ulje	18,9	0,0389	17,5	0,0376	16,3	0,0362	14,6	0,0349
5	Poliglikol	18,7	0,0471	16,0	0,0459	13,2	0,0449	10,5	0,0445
6	Ulje ananasa	17,2	0,0448	15,6	0,0430	13,7	0,0420	12,5	0,0412
7	TMP-ester	15,5	0,0418	14,4	0,0393	13,1	0,0381	12,2	0,0369
8	Diester	14,6	0,0467	13,6	0,0431	12,8	0,0419	11,6	0,0408
9	Polialfaolefin (PAO)	15,5	0,0410	13,8	0,0395	12,2	0,0389	10,5	0,0374

Slike 4.9 i 4.10 prikazuju zakonitost promjene viskoziteta o temperaturi uz konstantne vrijednosti pritiska i obratno za dva odabrana ulja [39]. Pokazalo se da zavisnost viskoziteta o pritisku, u režimu koji odgovara mješovitom trenju (uz konstantnu temperaturu), često raste brže nego što je opisano Roelands-ovim eksponencijalnim modelom (tablica 4.7).



Slika 4.9 Zavisnost viskoziteta o pritisku za turbinsko i transmisijsko ulje



Slika 4.10 Zavisnost viskoziteta o temperaturi za turbinsko i transmisijsko ulje

Moderna maziva ulja, naročito u uvjetima visokih pritisaka i temperatura, ne prate zakonitosti Newton-ovih fluida, odnosno zavisnost između smičnog naprezanja i brzine smične deformacije u mazivu nije linearna. Zakonitosti navedenih promjena uzimaju se u obzir reološkim⁸ modelima te na taj način obuhvaća utjecaj na podmazivanje, poglavito na veličinu faktora trenja u mazivu. Reološki modeli prikazani u tablici 4.9 temelje se na postavci da smično naprezanje u fluidu ne smije biti veće od graničnog smičnog naprezanja u kojem bi slučaju došlo do klizanja ili odvajanja uljnog filma od površine.

⁸ Reologija (grčki: reos+logia) je znanost o toku tekućeg fluida i deformacijama koje pri tome nastaju

Utjecaj pritiska na veličinu graničnog smičnog naprezanja opisali su Bair i Winer 1979. godine izrazom

$$\tau_L = \tau_0 + \gamma p, \quad 4.1$$

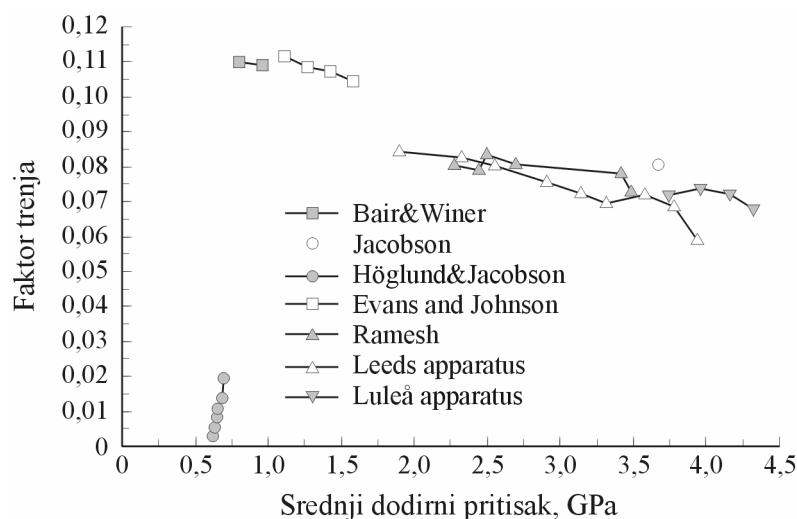
gdje je τ_L granično smično naprezanje, τ_0 granično smično naprezanje pri atmosferskom pritisku, γ faktor graničnog smičnog naprezanja i p pritisak. Porastom pritiska u uljnom filmu između dvije površine u kontaktu raste utjecaj drugog člana u izrazu. Kod vrlo visokih pritiska (što je uobičajena pojava kod dodira visoko opterećenih strojnih dijelova) drugi član postaje prevladavajući.

Tablica 4.9 Reološki modeli

	Autori i model	Brzina smične deformacije $\frac{\partial u}{\partial z}$
1	Newton	$\frac{\tau}{\eta}$
2	Eyring(1936) (sinh model)	$\frac{\tau_E}{\eta} \sinh \frac{\tau}{\tau_E}$
3	Bair i Winer (1979) (ln model)	$\frac{\tau_L}{\eta} \ln(1 - \bar{\tau})^{-1}$
4	Gecim i Winer (1980) (tanh model)	$\frac{\tau_L}{\eta} \tanh^{-1} \bar{\tau}$
5	Iivonen i Hamrock (1989) (pravocrtni model)	$\frac{\tau_L}{\eta} [(1 - \bar{\tau})^{-1} - 1]$
6	Elsharkawy i Hamrock (1991) (opći model)	$\frac{\tau}{\eta} [(1 - (\bar{\tau})^n)^{-1/n}]$
7	Lee i Hamrock (1990a) (cirkularni model)	$\frac{\tau}{\eta} [(1 - (\bar{\tau})^2)^{-1/2}]$

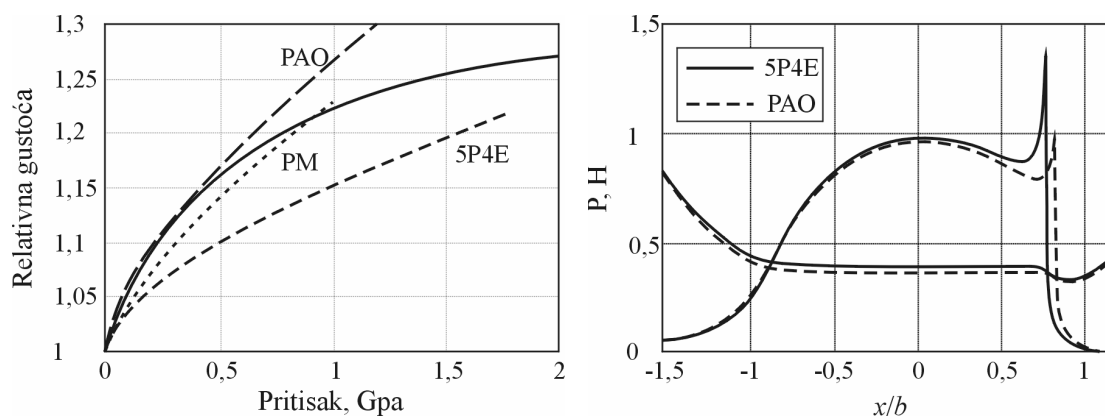
Tlačno-viskozitetnim koeficijentom i faktorom graničnog smičnog naprezanja obuhvaćeni su utjecaji pritiska i temperature na viskozitet maziva. Kako više vrijednosti viskoziteta odgovaraju višim vrijednostima tlačno-viskozitetnog koeficijenta te uzimajući u obzir relacije $h_{\min} \sim \eta^a$, $h_{\min} \sim \eta^b \cdot \alpha^c$ (a, b i c zavise od primjene proračunskog modela, a nalaze se u granicama od 0,49 do 0,68 [37]) jasno je da se s uljima s višim tlačno-viskozitetnim koeficijentom mogu postići veće debljine uljnog filma. S druge strane, ulja s nižim faktorom graničnog smičnog naprezanja imati će manje gubitke trenja (izražene naročito u

području fluidnog trenja i većih brzina) te potencijalno nuditi veću iskoristivost. Istraživanja više autora provedena u području utjecaja promjene viskoziteta s pritiskom na faktor trenja pokazala su navedeni trend [31] (slika 4.11).



Slika 4.11 Promjena faktora trenja za različite pritiske

Osim utjecaja pritiska i temperature na viskozitet, razmatranjem utjecaja na gustoću, odnosno stlačivost pokazuje se važnost odabira ulja ne samo vezano uz uvjete podmazivanja nego i uvjete rada. Naime, eksperimentima je pokazano da postoji veza između stlačivosti i vrijednosti pojedinih karakterističnih veličina u dodiru modeliranom u skladu s elastohidrodinamičkom teorijom podmazivanja. Ulje podložnije stlačivanju (čija relativna gustoća više raste s porastom pritiska; slika 4.12 lijevo, PAO) u središnjem će dijelu dodira formirati mazivi film manje debljine nego manje stlačivo (slika 4.12 lijevo, 5P4E), dok ista osobina gotovo uopće nema utjecaja na najmanju debljinu filma. S druge strane utjecaj na šiljak pritiska je značajnije izražen (slika 4.12, desno): za razliku relativne gustoće od približno 9,5 % pri pritisku od 1 GPa, razlika šiljaka pritiska iznosi gotovo 26 %. Ovakva se zavisnost tumači dimenzijama i složenošću molekula ulja, odnosno gustoće takvih ulja manje zavise o pritisku. Naprezanja elemenata u dodiru će stoga biti viša kod krućih ulja [37]. Uzme li se u obzir veliki broj izmjena s izraženim šiljkom pritiska i pripadno naprezanje elemenata može se uočiti mogući utjecaj na dinamičku izdržljivost, odnosno oštećenja površina u dodiru.



Slika 4.12 Promjena gustoće ulja s pritiskom i utjecaj na šiljak pritiska
 lijevo: Zavisnost gustoće o pritisku za tri ulja i model Dowson-a i Higginson-a
 desno: Razdioba i šiljak pritiska te debljina uljnog filma

Važnost navedenih osobina mazivih ulja pod utjecajem temperature i pritiska obrađuje se intenzivno u posljednjih 50 godina. Većina predloženih modela temelji se na regresiji, odnosno iznalaženju matematičkog modela temeljem rezultata mjerenja pa veliku ulogu u ocijeni valjanosti igra upravo dostupnost rezultata i ponovljivost eksperimenta. Jasno je da bi za optimalan izbor ulja u prijenosniku bilo potrebno obuhvatiti što je moguće veći broj značajki (geometriju i materijale strojnih elemenata u dodiru, brzinu vrtnje i način podmazivanja, dominantan oblik trošenja, temperaturu i opterećenje, intermitenciju, mogućnost pojave kratkotrajnih i/ili dugotrajnih preopterećenja, predviđeni vijek trajanja, itd.). Premda se utjecaj nekih navedenih veličina uspješno objedinjuje kroz teorije podmazivanja (vidjeti poglavlje br. 3), ipak ne postoji formalan proračun koji bi poslužio izboru ulja za predviđene uvjeta rada.

Viskozitet maziva i tlačno-viskozitetni koeficijent uzeti su obzir proračunom najmanje debljine uljnog filma kod pužnih parova prema [6, 7].

4.3.2 Izbor maziva u istraživanju

Za podmazivanje prijenosnika rabljenog u ispitivanju ulje je odabrano u skladu s preporukom za izbor ulja pužnih prijenosnika na temelju poznate brzine vrtnje i snage (tablica 4.10).

Tablica 4.10 Preporuka za izbor ulja prema viskozitetu pri 100°C

P , kW	Brzina vrtnje puža, o/min			
	100-250	250-750	750-2000	>2000
1-15	17	15	12	9,5
15-75	25-40	17	15	12
>75	-	25-40	17	15

U skladu s preporukom, za predviđene uvjete rada $n_{ul}=1450$ o/min, $P_{naz}=1,5$ kW, odabrano je ulje mineralne baze INA Epol SP 150, domaćeg proizvođača INA-industrija nafte d.d. Prema općim podacima proizvođača ulje je namijenjeno za podmazivanje zatvorenih zupčanih prijenosnika, ležaja i drugih uređaja u industriji u uvjetima visokih i udarnih opterećenja, a može se koristiti i u cirkulacijskim sustavima te u sustavima podmazivanim uljnom maglom. Područje primjene obzirom na temperaturu je do 100°C , a razinom kvalitete udovoljava propisima ISO 6743-6 (CKC), AGMA 9005 (5EP) i DIN 51517 Part 3 (CLP). Svojstva odabranog ulja prikazana su u tablici 4.11.

Tablica 4.11 Fizikalno-kemijska svojstva ulja Epol SP 150

Gustoća pri 15°C	Kinematski viskozitet		Indeks viskoznosti	Plamište (COC)	Tecište
	40°C	100°C			
kg/m^3	mm^2/s		-	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$
$0,902 \cdot 10^{-3}$	150	13,1	85	210	-20

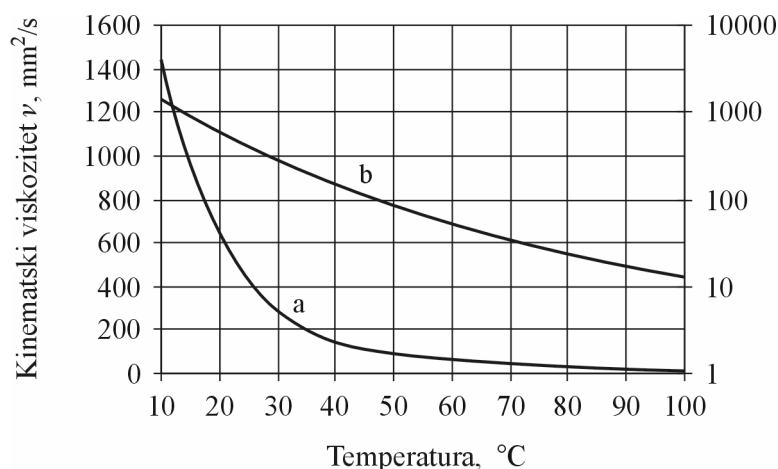
Važeća norma [6] i nacrt nove [7] za proračun nosivosti pužnih parova sadrže model za proračun kinematskog viskoziteta za područje temperatura od $0,1^{\circ}\text{C}$ do 100°C (slika 4.13) na temelju poznatih vrijednosti pri 40°C i 100°C

$$\nu_{\theta} = 10^{10A \cdot \log(\theta + 273) + B} - 0,7 \quad 4.2$$

gdje je

$$A = \frac{\log\left(\frac{\log(\nu_{40} + 0,7)}{\log(\nu_{100} + 0,7)}\right)}{\log\left(\frac{313}{373}\right)} \quad 4.3$$

$$B = \log(\log(\nu_{40} + 0,7)) - A \cdot \log(313). \quad 4.4$$



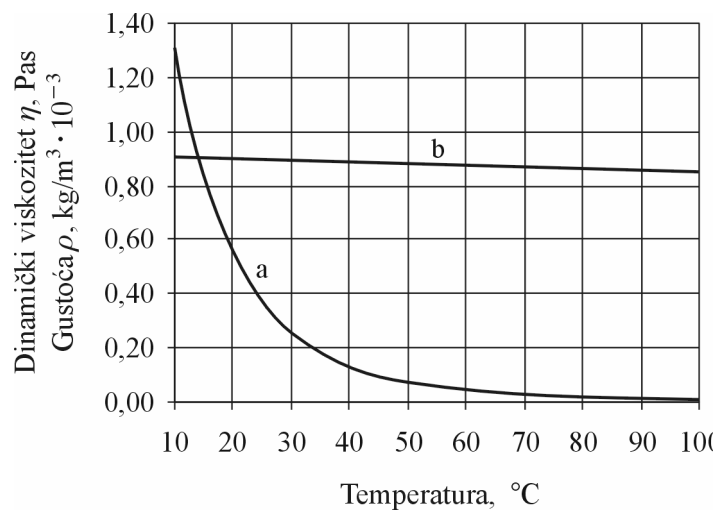
Slika 4.13 Zavisnost kinematskog viskoziteta o temperaturi prikazana u a) linearnom i b) logaritamskom mjerilu.

Na temelju poznate zakonitosti promjene kinematskog viskoziteta s temperaturom može se odrediti dinamički viskozitet (slika 4.14) kod atmosferskog pritiska pomoću izraza

$$\eta_{0M} = \nu_M \cdot \rho_M / 1000 \quad 4.5$$

gdje je gustoća za traženu temperaturu određena gustoćom pri 15°C i konstantom k koja za mineralna ulja iznosi $7,0 \cdot 10^{-4}$.

$$\rho_M = \frac{\rho_{15}}{1 + k \cdot (\theta_M - 15)} \quad 4.6$$



Slika 4.14 Zavisnost o temperaturi a) dinamičkog viskoziteta i b) gustoće

Temperatura pužnog kola θ_M određuje se u zavisnosti od temperature ulja i prirasta temperature uslijed gubitaka ozubljenja P_{Vz} (vidi odjeljak br. 3) kao prevladavajućih u radu pužnog para

$$\theta_M = \theta_S + \Delta\theta \quad 4.7$$

gdje je

$$\Delta\theta = \frac{1}{\alpha_L \cdot A_R} \cdot P_{Vz} \quad 4.8$$

Koeficijent prijelaza topline (izraz 4.9) sveden je na zavisnost o brzini vrtnje, a rashladna površina (izraz 4.10) je plašt cilindra čiji promjer odgovara srednjem promjeru pužnog kola.

$$\alpha_L = c_K \cdot (1940 + 15 \cdot n_1) \text{ za } n_1 \geq 150 \text{ min}^{-1} \quad 4.9$$

$$A_R = b_{2R} \cdot d_{m2} \cdot 10^{-6} \quad 4.10$$

Budući da je mjerenjima obuhvaćeno praćenje temperatura okoline i ulja proveden je i usporedni proračun prema navedenim normama. Analitičkim postupkom za određivanje temperature ulja kojim je obuhvaćen utjecaj opterećenja, brzine vrtnje, prijenosnog omjera, osnovnog razmaka, kinematskog viskoziteta i temperature okoline dobiveni su rezultati manji od mjerenih vrijednosti za više od 20°C. Premda su postupkom predviđene greške veće od $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ovakva velika razlika vjerojatno je posljedica relativno uskog područja primjene navedenog postupka izvedenog prema rezultatima za referentne uvjete ispitivanja određene normom.

TROŠENJE POVRŠINA DODIRA

Radni je vijek većine strojnih dijelova, pri dovoljno visokoj čvrstoći, ograničen trošenjem radnih površina. Trošenje ili habanje nije osobina već odziv sustava, rezultat procesa razaranja i odvajanja (otkidanja) materijala s površine strojnog dijela. Promjena oblika i izmjera dijela uslijed trošenja smanjuje točnost spajanja površina i uzrokuje pojavu šumova, buke, udara i vibracija pri radu.

5.1 VRSTE OŠTEĆENJA TROŠENJEM

Svaki je strojni element u većoj ili manjoj mjeri podložan trošenju. Procesi trošenja mogu biti prevladavajući ili popratni, a njihovi se udjeli mogu tijekom rada i mijenjati zavisno o trenutnim čimbenicima u pogonu. U recentnoj se literaturi mogu pronaći različite podjele mehanizama i vrsta trošenja. Jedna je takva podjela prikazana u tablici 5.1 [40].

Tablica 5.1 Podjela mehanizama i vrsta trošenja

Značajka	Veličina					
Trenje	Valjno	Klizno-valjno	Klizno		Freting	Udamo
Teoretska geometrija dodira	Kugla-kugla	Cilindar-cilindar	Ravna-ravna	Kugla-ravna	Cilindar-ravna	Šiljak-ravna
Razina dodimog pritiska	Elastično		Elasto-plastično		Plastično	
Brzina klizanja ili brzina pod opterećenjem	Mala		Srednja		Visoka	
Trenutna (<i>flash</i>) temperatura	Mala		Srednja		Visoka	
Kombinacija materijala	Jednaki	Tvrđi	Mekši		Kompatibilni	Nekompatibilni
Okolina	Vakuum	Plin		Tekućina		Emulzija
Broj izmjena	Mali (jediničan)		Srednji		Visoki	
Duljina kontakta	Kratka		Srednja		Velika	
Stanje trošenja	Čvrsto	Plastično	Tekuće	Plinovito	Atom	Ion
Struktura čestica trošenja	Osnovni materijal		Mehanička mješavina		Tribo-kemijska	
Vežanost čestica	Slobodna	Zarobljena		Umetnuta		Aglomerirana

Značajka	Veličina						
trošenja							
Red veličine čestica trošenja	mm		μm			nm	
Fizikalne i kemijske osnove trošenja	Fizička adsorpcija, kemijska adsorpcija, tribokemijska aktivacija i stvaranje tribofilma, oksidacija i delaminacija, oksidacija i disolucija, oksidacija i plinovita faza, promjena stanja, rekristalizacija, nastanak i propagacija pukotine, adhezivni prijenos						
Osnove dinamike sustava vezane uz trošenje	Vertikalne vibracije	Horizontalne vibracije	Vibracije samouzbuđene		Harmonijske vibracije		Gibanje s zastojećima (<i>Stick-slip motion</i>)
Prevladavajući proces trošenja	Lom (duktilni ili kruti)	Plastično tečenje	Fluidno tečenje	Disolucija		Oksidacija	Isparavanje
Mehanizam trošenja	Abrazija	Adhezija	Tečenje	Umor	Korozija	Taljenje	Difuzija
Tip trošenja	Mehaničko		Kemijsko			Termičko	

Od navedenih mehanizama trošenja kod pužnih se parova kao prevladavajući redovito pojavljuju:

- adhezija - prijelaz materijala s jedne na drugu taru plohu pri relativnom gibanju, a zbog procesa mikro-zavarivanja i
- umor površine - odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprežanja.

Pored navedenih moguće je još izdvojiti sljedeće:

- abrazija - trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikro-rezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice,
- tečenje - plastično tečenje materijala uslijed smičnog naprežanja,

Svi navedeni mehanizmi trošenja mehaničkog su tipa. Pored toga, a zavisno od dodataka u mazivu, može se kod pužnih parova pojaviti naglašeno kemijsko trošenje (u literaturi se često spominje kao tribokorozija ili tribokemijsko trošenje) kao posljedica reakcije dodataka s osnovnim materijalom pri povišenim temperaturama (vidi odjeljak 4.3).

Oštećenja koja su posljedica navedenih vrsta trošenja presudna su za karakteristike i vijek trajanja pojedinih strojnih elemenata. Tablica 5.2 prikazuje izvadak iz podjele slučajeva trošenja za dvije uobičajeno dominantne vrste te pripadnu razinu opasnosti [16].

Tablica 5.2 Podjela slučajeva trošenja

	Vrsta	Relativno gibanje	Mehanizam trošenja ¹ /stupanj opasnosti ²			
			AB	AD	UP	TK
1.	Klizno	Klizanje	4	1	3	5
2.	Kotrljajuće	Kotrljanje	4	4	1	5

1) AB – abrazija, AD – adhezija, UP – umor površine, TK – tribokorozija

2) 5 – najniži, 4 – niski, 3 – srednji, 2 – visoki, 1 – jako visoki

U tablici 5.3 [41] dat je izvadak pregleda uzroka nastajanja i vrsta oštećenja kod zupčanog para s aspekta normalne eksploatacije (pogon, održavanje) i posebno za uvjete podmazivanja. Analizom predloženih podataka može se naglasiti veći utjecaj sljedećih oblika trošenja:

- abrazivno trošenje (B) i brazdanje (E),
- zaribavanje (F),
- rupičavost (G),
- stvaranje valovitosti (K) i
- hladna plastična deformacija (M).

Tablica 5.3 Uzroci nastajanja i vrste oštećenja zupčanog para bez pojave loma

5. Pogon, održavanje	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5.1 Česta promjena opterećenja							•								
5.2 Udari, vibracije							•	•		•			•		•
5.3 Preopterećenje					•	•	•	•			•		•		
5.4 Manjkavo održavanje		•				•	•						•		
5.5 Manjkava kontrola		•				•	•						•		
6. Podmazivanje															
6.1 Nedostatak maziva	•	•				•					•	•	•		
6.2 Pogrešan viskozitet maziva	•				•	•	•				•				•
6.3 Nečistoće		•		•	•					•				•	
6.4 Nedostatna kvaliteta	•				•	•	•				•		•		•
6.5 Nepouzdan dovod maziva		•				•					•	•	•		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> A Normalno trošenje B Abrazivno trošenje C Smetnje u zahvatu zubi* D Ogrebotine E Brazde </div> <div> F Zaribavanje (scuffing) G Rupičavost (pitting) H Ljuštenje I Pukotine u materijalu J Utiskivanje </div> <div> K Stvaranje valovitosti L Vruća plastična deformacija M Hladna plastična deformacija N Kemijska korozija O Korozija trenja (fretting) </div> </div> <p>*prouzročene trošenjem</p>															

Za slučaj razmatranja samo pogona i održavanja mogu se izdvojiti:

- zaribavanje (F),
- rupičavost (G) i
- hladna plastična deformacija (M).

Što se tiče normalnog trošenja (A) moglo bi se prema tablici 5.3 doći do zaključka kako ono neće imati važnu ulogu ako su zadovoljeni pripadni uvjeti podmazivanja (6.1, 6.2 i 6.4). Poznato je međutim da postoje i drugi relevantni čimbenici vezani uz pojavu trošenja kod pužnih parova.

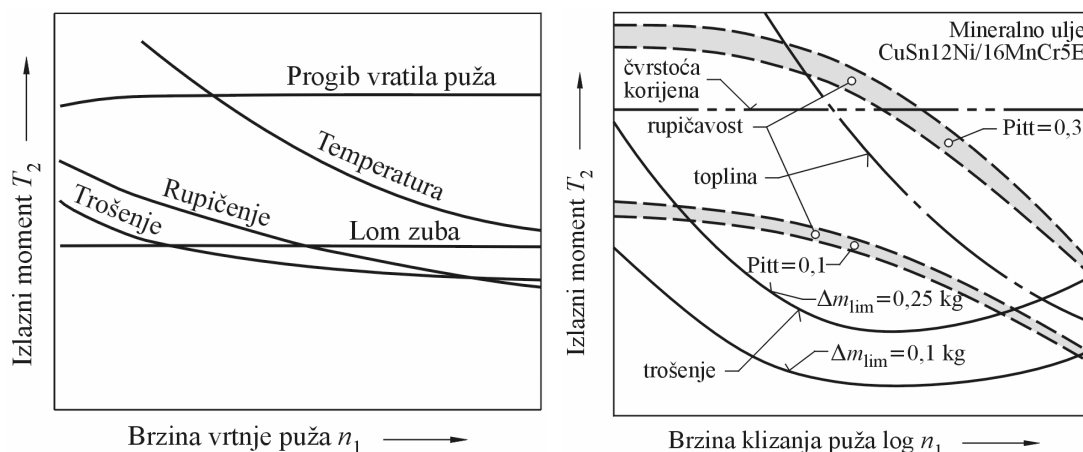
Važeća norma [6] kao i nacrt nove [7] za proračun opteretivosti pužnih parova daju pregled čimbenika s najvećim utjecajem na pojedine mehanizme trošenja i oštećenja (tablica 5.4). Očigledan je utjecaj pojedinih veličina na većinu oblika trošenja i oštećenja. Potrebno je međutim primijetiti da nije riječ o nezavisnim veličinama. Tako su, na primjer, Hertz-ov pritisak, brzina vrtnje puža i primijenjeno ulje (kroz viskozitet i tlačno-viskozitetni koeficijent) obuhvaćeni u proračunu najmanje debljine uljnog filma.

Tablica 5.4 Utjecaj pojedinih čimbenika na trošenje i oštećenja

Utjecajni faktori	Mehanizmi trošenja i stupanj djelovanja					
	Trošenje ⁹	Rupičenje	Lom zuba	Progib vratila puža	Zaribavanje	Smanjenje stupanja korisnog djelovanja
Hertz-ov pritisak	+	+	+	+	+	+
Brzina puža	+	+			+	+
Debljina uljnog filma	+	+			+	+
Ulje	+	+			+	+
Slika nošenja	+	+	+		+	+
Hrapavost površine bokova puža	+	+			+	+
Smično naprezanje			+			

Navedene norme daju i kvalitativan pregled ograničenja izlaznog momenta u zavisnosti o pojedinim veličinama i vrstama oštećenja (slika 5.1). Prikaz lijevo predstavlja samo primjer radnog područja te bi za svaku pojedinu kombinaciju ukupnih konstrukcijskih i radnih parametara bilo potrebno načiniti novi. Određivanje granica područja provodi se nezavisno za svaku od navedenih veličina ili mehanizama trošenja, a njihov utjecaj može biti drugačiji, zavisno od kombinacije parametara. Kvalitativni rezultati istraživanja [2] provedenih za odabranu kombinaciju uvjeta prikazani su desno.

⁹ Ovdje se pod trošenjem podrazumijeva kontinuirani gubitak mase zuba što, uz poznate uvjete rada, odgovara prevladavajućem adhezivnom trošenju u kombinaciji s tribokemijskim.

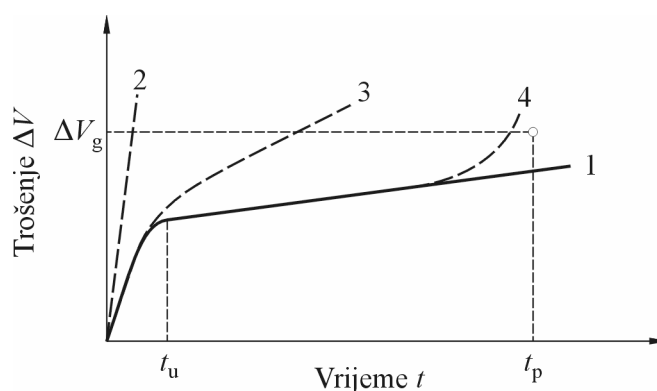


Slika 5.1 Primjer ograničenja izlaznog momenta obzirom na oštećenja i uvjete rada,
 lijevo – za manje osne razmake [6], [7], 1998
 desno – za prijenosnik ispitivan u [2], 1978

Zbog opće primjene zupčanika istraživanje ovih, očito najčešćih oblika oštećenja, je od velikog značaja. U daljnjem razmatranju biti će obuhvaćeni adhezija i rupičenje kao mehanizmi trošenja koji se uobičajeno nalaze u radu pužnih prijenosnika te abrazija, koja se, tijekom normalnog radnog vijeka, pojavljuje najčešće kao popratni mehanizam.

5.1.1 Adhezija

Poradi uobičajene kombinacije materijala pužnih parova, gdje je puž obično tvrda, a pužno kolo meka komponenta, pužno je kolo izloženo daleko većem trošenju. Nažalost, prevladavajući udio u često korištenim materijalima pužnih kola (poglavito bakrenim i aluminijskim slitinama) imaju elementi skloni mikrozavarivanju s čelikom te su stoga u dodiru tribološki nekompatibilni, odnosno podložni adhezivnom trošenju. Čestice otkinute s bokova zubi pužnog kola ne ostaju trajno na bokovima zubi puža već otpadaju ili bivaju otkinute tijekom ponovnog zahvata, a njihov je oblik uglavnom listićast. Sam proces trošenja se može podijeliti na tri perioda [16] (slika 5.2):



Slika 5.2 Procesi trošenja kliznih elemenata

1. Period puštanja u pogon do nekog vremena t_u je tzv. *period uhodavanja* ili *urađivanja* radnih površina. U ovom vremenskom periodu, kao rezultat elastičnih i plastičnih deformacija mikro-neravnina, formira se novi mikro-reljef površina s nekom ravnomjernom hrapavosti. Proces uhodavanja prati razvijanje topline, zbog čijeg smanjenja se ovaj proces provodi u uvjetima blažim od eksploatacijskih (pri manjim iznosima parametara opterećenja od onih u eksploataciji). U cilju smanjenja vremena uhodavanja, potrebno je, na osnovu eksperimentalnih podataka, odrediti parametre ravnomjerne hrapavosti, a za izradu strojnog dijela definirati hrapavost vrlo blisku ravnomjernoj. Kod pužnih prijenosnika je proces uhodavanja od iznimnog značaja. Naime, uhodavanjem se teži postizanju potpune slike nošenja, odnosno većem udjelu površine boka zuba pužnog kola u preuzimanju opterećenja te se istovremeno, radi uglačavanja površine, smanjuje faktor trenja. U posebnim se slučajevima, kod odgovornih prijenosnika, koriste i posebni aditivi za uhodavanje, a nakon postupka se provodi čišćenje i izmjena ulja.
2. Period nakon uhodavanja (t_p-t_u) je tzv. *period određenog trošenja* ili *period prihvatljivog trošenja*. Ovaj vremenski period karakteriziran je minimalnim trošenjem pri zadanim uvjetima rada. Izravnane radne površine u procesu uhodavanja stvaraju pretpostavke za njihov elastični dodir. Zavisno od dodataka u ulju u ovoj fazi se može govoriti o kombinaciji adhezivnog trošenja i tribokorozije.
3. Period nakon zadovoljavajuće dugog vremena rada t_p je tzv. *period katastrofalnog istrošenja* koje je nedopustivo u eksploataciji, jer se, zbog povećanja zračnosti između radnih površina, javljaju udari koji temeljno mijenjaju svojstva površinskih slojeva dajući im neželjenu krtoš (lomljivost). Ovaj period nije vidljivo iskazan na slici. Jedan od aktualnih ciljeva u istraživanju trošenja strojnih elemenata je upravo utvrđivanje vremena početka ovog perioda.

Krivulja 1 na slici 5.2 pokazuje zadovoljavajući tijek procesa trošenja. Dodatno su prikazani i slučajevi neuspješnog uhodavanja (krivulja 2, npr. kod jako izražene adhezije), ubrzanog trošenja (krivulja 3, npr. kada čestice, produkti adhezijskog trošenja, djeluju abrazivno) te preranog umora površine (krivulja 4).

Poznavanje trajnosti pužnog para, poglavito pužnog kola, podatak je na temelju kojeg se može provesti planiranje i procjena troškova preventivnog održavanja, ocjena ekonomičnosti, a danas i neizbježnog ekološkog aspekta uporabe i konstrukcije. Procjene graničnog istrošenja pužnog kola većinom se temelje na podacima dobivenim eksperimentalnim istraživanjima za određene kombinacije čimbenika te se aproksimiraju u cilju iznalaženja analitičkog modela. Primjena određenog modela ima za pretpostavku radne uvjete koji odgovaraju uvjetima provedenih ispitivanja, a odstupanje od ovakvih referentnih uvjeta za sobom obično povlači i veću ili manju grešku, zavisno od toga koliko se isti razlikuju. Huber je 1978. godine [2] na temelju opsežnih istraživanja i radova drugih

autora formulirao zavisnost između Hertz-ovog pritiska i intenziteta trošenja s naglašenom analogijom proračunu za čelnike prema ISO normi:

$$\Delta m_s \approx 10^{-6} K_{WW} \cdot K_{LW} \cdot Z_{VW} \cdot Z_{RW} \left(\frac{\sigma_H}{1,27} \right)^4 \quad 5.1$$

gdje je

K_{WW} – faktor materijala,

K_{LW} – faktor maziva,

Z_{VW} – faktor brzine i

Z_{RW} – faktor hrapavosti.

Izraz za dopušteni pritisak na bokovima formuliran je u skladu s navedenim faktorima:

$$\sigma_{WP} = \frac{\sigma_{Wlim} \cdot K_{WW} \cdot K_{LW} \cdot Z_{VW} \cdot Z_{RW}}{S_{Wmin}} \quad 5.2$$

gdje je

σ_{Wlim} – osnovna značajka čvrstoće trošenja koja odgovara onom pritisku bokova kod kojeg će doći do graničnog istrošenja (Δm_{lim}^{10}) u predviđenom vijeku trajanja izraženom preko broja izmjena opterećenja na pužnom kolu (LW^{10}),

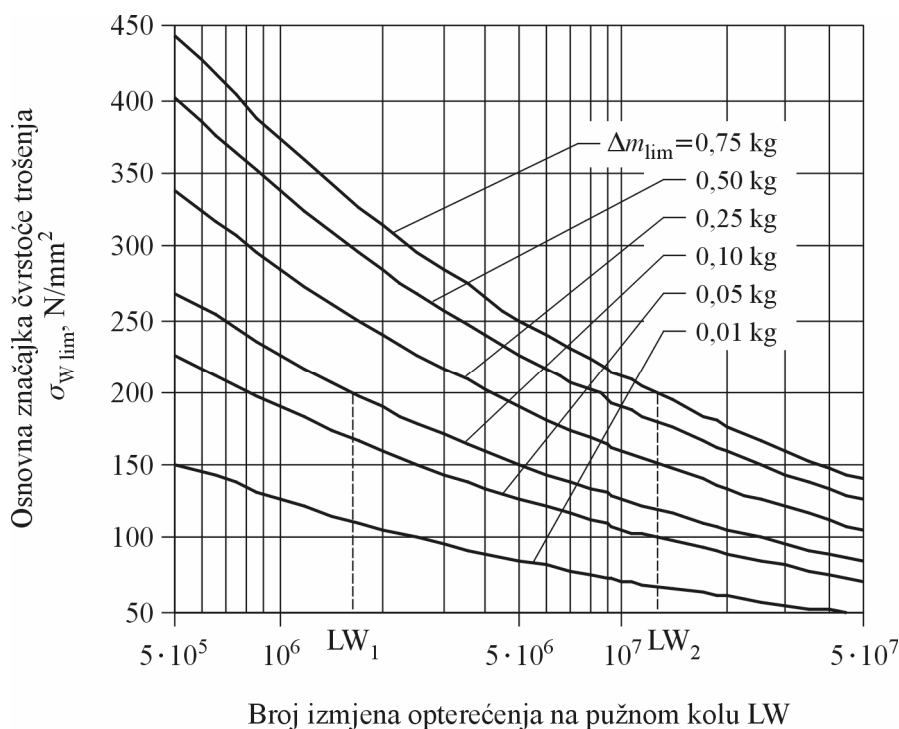
S_{Wmin} – najmanji faktor sigurnosti obzirom na trošenje.

Pomoću izraza 5.1 i 5.2, vrijednosti navedenih faktora, približne površine bokova zubi, poznate dinamike trošenja utvrđene mjerenjem te broja izmjena opterećenja na pužnom kolu Huber [2] je postavio zavisnost između osnovne značajke čvrstoće trošenja i graničnog istrošenja:

$$\sigma_{Wlim} = 1,27 \cdot \left(\frac{10^{16} \cdot \Delta m_{lim}}{LW} \right)^{0,25} \quad 5.3$$

Variranjem iznosa graničnog istrošenja može se navedeni izraz prikazati dijagramom (slika 5.3). Za slučaj jednakog iznosa značajke čvrstoće broj izmjena opterećenja pužnog kola će biti veći kod većeg dopuštenog graničnog istrošenja odnosno, za neki projektirani vijek trajanja značajka čvrstoće će biti veća u slučaju većeg dopuštenog graničnog istrošenja. Vrijednosti su direktno primjenjive za referentnu kombinaciju materijala puž/pužno kolo 16MnCr5/CuSn12 podmazivano mineralnim uljem legiranim EP dodacima te antikorozivnim i dodacima protiv starenja, kinematskog viskoziteta pri 50°C 225 mm²/s i indeksa viskoznosti 95.

¹⁰ U važećoj se normi [6] granično istrošenje označava s δ_{Wlim} , a broj izmjena opterećenja na pužnom kolu s N_L



Slika 5.3 Veza graničnog istrošenja, čvrstoće i broja izmjena

Važeća se norma za proračun opteretivosti pužnih parova [6] kao i nacrt nove [7] također temelje na parametarskoj zavisnosti graničnog istrošenja o pojedinim čimbenicima kako je prikazano u [2], ipak niti veličine, a ni njihov broj nisu sadržane u izvornom obliku. Ciljana veličina u normi je sigurnost u odnosu na trošenje koja se određuje omjerom graničnog i očekivanog trošenja za određene uvjete rada:

$$S_{Wlim} = \delta_{Wlimn} / \delta_{Wn} \geq S_{Wmin} \quad 5.4$$

gdje je

δ_{Wlimn} – granično istrošenje u normalnoj ravnini

δ_{Wn} – očekivano istrošenje,

$S_{Wmin} = 1,1$ – najmanji faktor sigurnosti obzirom na trošenje.

Očekivano istrošenje definirano je preko intenziteta trošenja i puta trošenja

$$\delta_{Wn} = J_W \cdot s_{Wm}, \quad 5.5$$

a put trošenja s_{Wm} preko srednjeg puta klizanja s_{gm} i broja izmjena opterećenja N_L . Srednji put klizanja izražen je preko Bezdimenzijskog faktora srednjeg puta klizanja s^* , srednjeg dodirnog pritiska σ_{Hm} , osnovnog razmaka a i ekvivalentnog modula elastičnosti E_{red} :

$$s_{Wm} = s_{gm} \cdot N_L = s^* \cdot \frac{\sigma_{Hm} \cdot a}{E_{red}} \cdot N_L \quad 5.6$$

Broj izmjena opterećenja (N_L) i ekvivalentni modul elastičnosti (E_{red}) proračunavaju se direktno temeljem poznatih podataka, dok se srednji put klizanja i srednji dodirni pritisak računaju pomoću izraza dobivenih regresijom za bezdimenzijske parametre s^* i p_m^* (vidi 5.7 i 5.9).

$$s^* = 0,78 + 0,21 \cdot u + \frac{5,6}{\tan \gamma_{ml}} \quad 5.7$$

$$\sigma_{Hm} = \frac{4}{\pi} \left(\frac{p_m^* \cdot T_2 \cdot 10^3 \cdot E_{red}}{a^3} \right)^{0,5} \quad 5.8$$

$$p_m^* = 1,03 \cdot \left(0,4 + \frac{x}{u} + 0,01 \cdot z_2 - 0,083 \cdot \frac{b_{2H}}{m_x} + \frac{\sqrt{2q-1}}{6,9} + \frac{q + 50 \frac{u+1}{u}}{15,9 + 3,75 \cdot q} \right). \quad 5.9$$

Vrijednost intenziteta trošenja J_W izražena je pomoću referentnog intenziteta trošenja J_{OT} , parametra kombinacije materijala i maziva W_{ML} te parametra intermitencije W_{NS} .

$$J_W = J_{OT} \cdot W_{ML} \cdot W_{NS}. \quad 5.10$$

Vrijednosti parametra kombinacije materijala i maziva određene su za relativno mali broj materijala (vidi poglavlje br. 4) i tri vrste maziva uz moguća velika odstupanja ili ograničenja u primjeni. Tako vrijednost parametra za kombinaciju materijala 16MnCr5/CuSn12 i mineralno ulje iznosi $W_{ML} = 1,6$ uz moguće odstupanje od $\pm 25\%$.

Vrijednost referentnog intenziteta trošenja određena je na temelju eksperimentalnih rezultata za različite kombinacije materijala puža i pužnog kola, primijenjenog ulja i načina podmazivanja, a u zavisnosti od parametra debljine uljnog filma K_W . Podaci su iskazani u obliku dijagrama ili analitičkih modela dobivenih linearnom regresijom. Za kolo od materijala CuSn12 i podmazivanje uranjanjem u mineralnom ulju vrijednost se određuje izrazom

$$J_{OT} = 6,5 \cdot 10^{-11} \cdot K_W^{-2,68} \leq 400 \cdot 10^{-9}. \quad 5.11$$

faktor debljine uljnog filma (vidi izraz 5.12) definiran je u zavisnosti o srednjoj najmanjoj debljini uljnog filma $h_{min m}$, faktoru strukture ulja W_S (za mineralno ulje iznosi 1) te faktoru pritiska W_H (za pužna kola načinjena od bronce vrijednost iznosi 1 za $\sigma_{Hm} < 450 \text{ N/mm}^2$).

$$K_W = h_{min m} \cdot W_S \cdot W_H. \quad 5.12$$

Najmanja srednja debljina uljnog filma $h_{min m}$ izražena je, pored ostalih vrijednosti, pomoću bezdimenzijskog faktora srednje najmanje debljine uljnog filma h^* , a temelji se na teoriji elastohidrodinamičkog (EHD) podmazivanja:

$$h_{\min m} = 21 \cdot h^* \frac{c_{\alpha}^{0,6} \cdot \eta_{0M}^{0,7} \cdot n_1^{0,7} \cdot a^{1,39} \cdot E_{\text{red}}^{0,03}}{T_2^{0,13}} \quad 5.13$$

gdje je

$$h^* = 0,018 + \frac{q}{7,86 \cdot (q + z_2)} + \frac{1}{z_2} + \frac{x}{110} - \frac{u}{36300} + \frac{b_{2H}}{370,4 \cdot m_x} - \frac{\sqrt{2q-1}}{213,9}. \quad 5.14$$

Za određivanje graničnog istrošenja u normalnoj ravnini $\delta_{W \lim n}$ propisana su četiri kriterija [6]:

- a) Debljina zuba u normalnoj ravnini na tjemenu (vanjskom) promjeru pužnog kola ne smije biti jednaka nuli (zub ne smije biti zašiljen) jer može doći do loma zuba. Tako je uvjet za granično istrošenje debljina zuba određen geometrijskom zavisnošću izrazom

$$\delta_{W \lim n} = m_x \cdot \cos \gamma_{m1} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - 2 \cdot \tan \alpha_0 \right). \quad 5.15$$

- b) Granično istrošenje određeno je graničnim smanjenjem debljine zuba Δs_{\lim} prema najmanjoj sigurnosti od puknuća zuba $S_{F \min}$.

$$\delta_{W \lim n} = \Delta s_{\lim} \cdot \cos \gamma_{m1} \quad 5.16$$

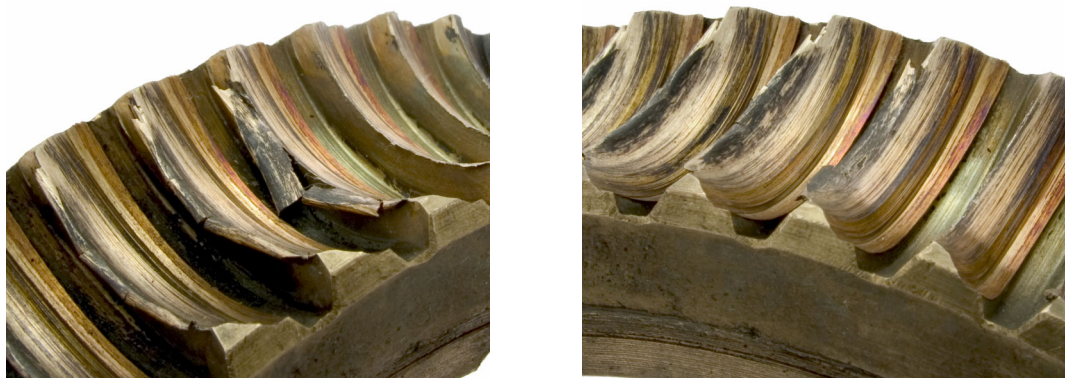
- c) Gubitak materijala pužnog kola ne smije prijeći unaprijed postavljenu granicu (zavisno od intervala izmjene ulja i podmazivanja ležajeva). Ovdje je ukupna površina bokova zuba pužnog kola A_{fl} izražena kao približna vrijednost. U poglavlju br. 7 pokazana je greška ove aproksimacije obzirom na poznatu geometriju pužnog kola. Gustoća materijala pužnog kola ρ_{rad} se kreće u granicama od 7 do 8,8 mg/mm³ za materijale pužnih kola pobrojane u normi (vidi poglavlje br. 4).

$$\delta_{W \lim n} = \frac{\Delta m_{\lim}}{A_{fl} \cdot \rho_{\text{Rad}}}. \quad 5.17$$

- d) Granično istrošenje ne smije prijeći unaprijed zadanu vrijednost koja se očituje u povećanju praznog hoda između puža i pužnog kola. U praksi se često za ovu vrijednost uzima $\delta_{W \lim} \cong 0,3 \cdot m_x$, pa je granično istrošenje u normalnoj ravnini

$$\delta_{W \lim n} = 0,3 \cdot m_x \cdot \cos \gamma_{m1}. \quad 5.18$$

Slika 5.4 prikazuje lom zuba pužnog kola od materijala CuSn12 kao posljedicu smanjene debljine uslijed trošenja. Na zubima koji nisu pretrpjeli lom može se vidjeti zašiljenost kao rezultat prekomjernog trošenja zuba pužnog kola. Sigurnost od pojave zašiljenosti obuhvaćena je kroz najmanju debljinu zuba na tjemenu promjeru ili najveću dopuštenu istrošenost pomoću kriterija a i b.



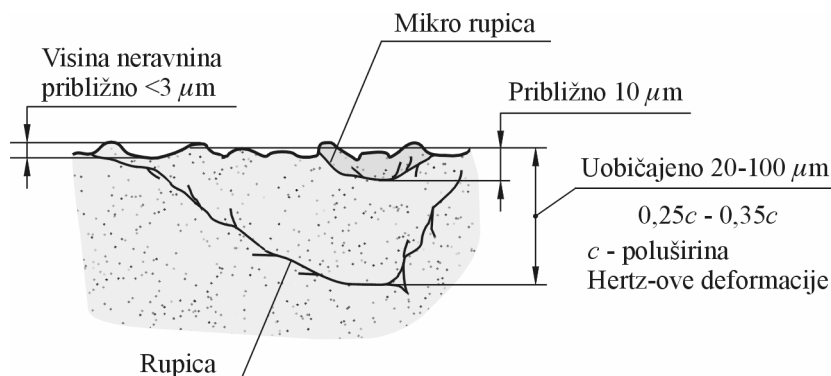
Slika 5.4 Istrošenost zubi pužnog kola

Proračun sigurnosti obzirom na trošenje [6] obuhvaća cijeli niz čimbenika u radu prijenosnika s pužnim parovima. Obzirom na složenost uvjeta navedenih prijenosnika vrijednosti pojedinih značajki se temelje na rezultatima eksperimentalnih istraživanja, bilo da je riječ o iskustvenim podacima i izrazima ili analitičkim modelima dobivenim regresijom. Proračun se temelji na geometriji, kombinaciji materijala i odabranom ulju referentnog prijenosnika s mogućnosti prilagodbe vrijednosti pojedinih značajki možebitnim drugačijim uvjetima uz pretpostavljenu grešku. Utjecaji preopterećenja, promjene nazivnog opterećenja te progiba vratila puža ovim proračunom nisu uzeti u obzir. Važno je napomenuti da je istrošenje zuba pužnog kola veličina koju je moguće mjeriti posredno preko povećanja praznog hoda (kuta zakreta) između puža i pužnog kola.

5.1.2 Umor materijala

Umor je takav oblik trošenja gdje, uslijed velikog broja cikličkih promjena opterećenja, dolazi do nastanka pukotina u materijalu (slika 5.5). Mjesto nastanka i vrsta inicijalne pukotine zavisi o mikro-strukturi materijala, naprezanju te mikro i makro geometriji. Općenito se u literaturi navode dvije vrste inicijalnih pukotina [16], [35], [42], [43], [44]:

- površinske pukotine i
- pod-površinske pukotine.



Slika 5.5 Inicijalna površinska pukotina i podpovršinska pukotina

Za površinske se pukotine smatra da nastaju zbog nepravilnosti prisutnih na površini materijala (hrapavost, tragovi obrade i oštećenja, izbočine, ukljucci i sl.). Postoji nekoliko različitih teorija o napredovanju pukotina, kako za slučajeve suhog, tako i podmazivanog dodira.

Za pod-površinske pukotine se smatra da nastaju uslijed najvećeg smičnog naprezanja kod koncentriranog dodira (tzv. Hertz-ovog naprezanja) uglavnom zbog nepravilnosti dublje pod površinom. Osim nehomogenosti materijala pokazano je da veliki broj ciklusa izmjena opterećenja ima ključnu ulogu u nastanku inicijalnih pukotina. U slučaju kada ispod površine dođe do plastične deformacije, u kombinaciji s brojem ciklusa izmjene opterećenja doći će do porasta tvrdoće. Razlika u tvrdoći materijala uzrokuje koncentraciju naprezanja i predstavlja mjesto vjerojatnog nastanka inicijalne pukotine. Napredovanje i kolaps pukotina se također tumači s nekoliko različitih teorija. Za ovaj je rad značajno istraživanje provedeno na čelnicima s ravnim zubima načinjenim od nodularnog lijeva [43]. Autori nastanak pod-površinske pukotine vežu uz kristalnu strukturu materijala gdje cikličko naprezanje oslabljuje veze između metalne strukture i kuglastog grafita te inducira nastanak mikro pukotina čak i bez nekih posebnih nepravilnosti u homogenosti materijala. Pukotine napreduju prema bližim kuglicama, a smjer se mijenja zavisno od koncentracije kuglica grafita u njihovoj blizini.

Nastanak i napredovanje (propagacija) pukotina manifestira se u odvajanju (često i ispadanju) čestica pa se na površini boka pojavljuju rupice. U literaturi ne postoji jednoznačno prihvaćeno nazivlje za oštećenja koja nastaju kao rezultat navedenih vrsta pukotina, a uobičajeni su nazivi mikro piting i piting, piting i makro piting te piting i *spalling* (raspadanje). Navedena se oštećenja redovito razlikuju prema dubini i površini nastalih rupica, a poradi terminologije uvriježene kod nas u ovom će se radu nazivati kako slijedi:

- mikro rupičenje (mikro piting) za oštećenja uglavnom nastala kolapsom površinskih pukotina, manjih površina i dubina, oblik koji se češće javlja kod termički obrađenih dijelova visoke površinske tvrdoće, i
- rupičenje (piting) za oštećenja uglavnom nastala kolapsom pod-površinskih pukotina. Prema opsegu može se razlikovati inicijalno rupičenje i napredno rupičenje. Inicijalno se rupičenje može pojaviti u vrlo kratkom vremenskom periodu zavisno od mnogih čimbenika (brzina klizanja, opterećenje-preopterećenje, podmazivanje, kvaliteta površine, temperatura i sl.). U normalnim je okolnostima adhezivno trošenje prevladavajuće te može dovesti do potpunog nestanka inicijalnog rupičenja. Napredno ili propagirajuće rupičenje pojava je svojstvena periodu katastrofalnog istrošenja u slučaju normalnog vijeka trajanja pužnog para. Brzina adhezivnog trošenja je premala te ne može smanjiti udio površine oštećene rupičenjem. U ovom se periodu često može

pojaviti abrazija kao prevladavajuća vrsta trošenja. Naime, čestice materijala koje se intenzivnije odvajaju s površine ulaze u zahvat i abradiraju površinu pužnog kola, a moguće i puža. Iznos trošenja može biti takav da rupičenje u potpunosti nestane, ali je hrapavost površina tada daleko veća (slika 5.11).

Dubine oštećenja u prvom slučaju u pravilu su manja od $10\text{ }\mu\text{m}$, a u drugom od $20\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$ za konstrukcijske čelike uobičajene za izradu zupčanika [44]. Kod zupčanika načinjenog od nodularnog lijeva [43] nađene su dubine oštećenja od $180\text{ }\mu\text{m}$.

Prema [44] nije vjerojatno da će se iz površinskih pukotina razviti rupičenje s značajkama pod-površinskih pukotina. Premda je pojava mikro rupičenja izgledna i u radu pužnih prijenosnika, upravo bi adhezivno trošenje moglo utjecati na njegov nestanak. Kada se postigne zadovoljavajuća slika nošenja te dođe do uglačavanja površina bokova zubi pužnog kola smanjuje se i vjerojatnost pojave mikro rupičenja.

Nastanku rupičenja obično prethodi poseban, rastrešen izgled površine (slika 5.6, lijevo) s finom mrežom pukotina. Ova se mreža može povezati s kolapsom pod-površinskih pukotina odnosno njihovim izbijanjem na površinu. Izgled mreže može poslužiti kao indikacija za predviđanje koji dio materijala će se odvojiti s boka. U toj su fazi nastanka oštećenja navedeni dijelovi slabo povezani s ostatkom materijala te ih je moguće odvojiti (izvaditi) iglom ili pincetom. Ako tijekom rada, nakon ispadanja, budu povučeni u zahvat pužnog para uzrokuju abrazivna oštećenja te gube početnu geometriju, a u protivnom se talože na dnu prijenosnika (slika 5.6, desno).



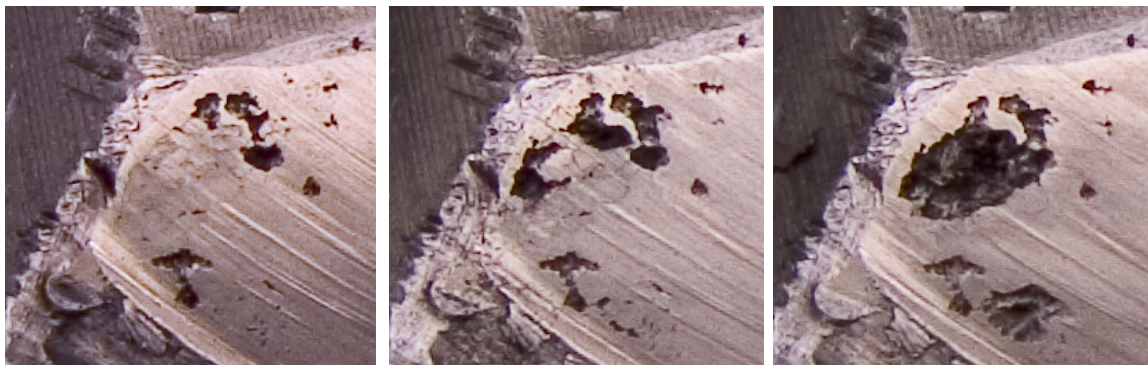
Slika 5.6 Rastrešenost površine boka (lijevo) i odvojene čestice (desno)

Kod bokova zubi pužnih kola obično se rupičenje u inicijalnoj fazi pojavljuje na izlaznoj strani, a poradi postupka uhodavanja (vidi poglavlje 9.2). Međutim, u slučaju loše slike nošenja (slika 5.7), kada zub pužnog kola ostvaruje dodir na ulaznoj i izlaznoj strani, ali ne i u središnjem dijelu, može se rupičenje pojaviti i na ulaznoj strani zuba.



Slika 5.7 Pojava rupičenja i na ulaznoj strani zuba kod loše slike nošenja

Obzirom na mehanizam nastajanja rupica promjene veličine površina oštećenja rupičenjem događaju se skokovito, zavisno od veličine odvojenih čestica (slika 5.8). U trenutku pregleda površine nije moguće, bez mehaničkog djelovanja na površinu, utvrditi koliko je čvrsta veza pojedinih čestica s osnovnim materijalom te kada će doći do odvajanja. Pored toga, upitna je i uloga ovakvih labilnih čestica tijekom rada. Sve navedeno doprinosi mjernoj nesigurnosti, odnosno određivanju stvarne površine boka oštećene rupičenjem.



Slika 5.8 Napredovanje rupičenja na ulaznoj strani zuba pužnog kola

Za razliku od trošenja, sigurnost protiv rupičenja je u važećoj normi [6] obrađena u značajnije manjem obimu. Naime, trenutno na raspolaganju ne postoji prihvaćen i normiran postupak za točno određivanje dodirnog pritiska koji bi predstavljao granični dodirni pritisak mjerodavan za ocjenu pojave rupičenja. Postupak propisan normom temelji se na do sada provedenim mjerenjima te je područje njegove primjene ograničeno na relativno usko područje uvjeta. Sigurnost u odnosu na pojavu rupičenja određena je izrazom:

$$S_H = \sigma_{HG} / \sigma_{Hm} \geq S_{H \min} \quad 5.19$$

gdje je

σ_{HG} – granični dodirni pritisak

σ_{Hm} – srednji dodirni pritisak (prema izrazu 5.8),

$S_{H \min} = 1,0$ – najmanji faktor sigurnosti obzirom na rupičenje.

Granični dodirni pritisak određuje se na temelju granice dodirne izdržljivosti materijala pužnog kola $\sigma_{H \text{ lim}}$ i pet iskustvenih faktora kojima su obuhvaćeni uvjeti rada:

$$\sigma_{HG} = \sigma_{H \text{ lim}} \cdot Z_h \cdot Z_v \cdot Z_s \cdot Z_u \cdot Z_{oil} \quad 5.20$$

gdje je

- $Z_h = \left(\frac{25000}{L_h} \right)^{1/6} \leq 1,6$ – faktor radnog vijeka,
- $Z_v = \sqrt{\frac{5}{4 + v_g}}$ – faktor brzine,
- $Z_s = \sqrt{\frac{3000}{2900 + a}}$ – faktor veličine,
- $Z_u = \left(\frac{u}{20,5} \right)^{1/6}$ za $u \leq 20,5$, $Z_u = 1$ za $u \geq 20,5$ – faktor prijenosnog omjera i
- Z_{oil} – faktor ulja zavisao od vrste ulja kojom se provodi podmazivanje (iznosi 1 za poliglikol, 0,94 za polialfaolefin i 0,89 za mineralno ulje).

Brzina klizanja u izrazu za faktor brzine odgovara brzini na srednjem promjeru pužnog vijka kao dobroj aproksimaciju za proračun nosivosti (izraz dolje), a vrijednosti granica dodirne izdržljivosti za pojedine materijala pužnog kola prikazane su u tablici 5.5.

$$v_g = \frac{d_{ml} \cdot n_l}{\cos \gamma_{ml}} \quad 5.21$$

Tablica 5.5 Granica dodirne izdržljivosti materijala pužnog kola

Materijal pužnog kola	GZ-CuSn12	GZ-CuSn12Ni2 GC-CuSn12Ni2	GZ-CuAl10Ni	GGG-40	GG-25	AlSn6
$\sigma_{H \text{ lim}}, \text{ N/mm}^2$	425	520	660*	490*	350*	300**
* za brzine klizanja $v_g < 0,5 \text{ m/s}$						
** prema [4]						

Obzirom na prirodu procesa trošenja i rupičenja vidljiva je značajna razlika u složenosti proračuna. Razlog tome prvenstveno treba tražiti u složenosti mehanizama trošenja koji dovode do nastanka i napredovanja rupičenja te nemogućnosti utvrđivanja odnosa i važnosti pojedinih čimbenika u tom procesu. Dodatno, u važećoj se normi [6] u neformalnom obliku, na temelju prethodno prikazanog proračuna nosivosti, navodi i proračun procjene trajanja pužnog para obzirom na oštećenje rupičenjem. U tom smislu, radni je vijek pužnog para određen ukupnim brojem ciklusa opterećenja

$$N_L = N_{LI} \cdot N_{LII} \cdot N_{LIII} \quad 5.22$$

koji je izražen kroz tri karakteristična perioda:

1. Period početka stvaranja rupičenja s pripadnim brojem izmjena N_{LI} .
2. Period prirasta površine oštećene rupičenjem s pripadnim brojem izmjena N_{LII} .
3. Period normalnog trošenja (prevladavajućeg adhezivnog i/ili tribokorozivnog trošenja) s pripadnim brojem izmjena N_{LIII} .

Početni period traje od početka rada do pojave prvog rupičenja definiranog udjelom površine oštećene rupičenjem u odnosu na ukupnu površinu bokova zuba pužnog kola u iznosu $A_{P10}=2\%$. Broj ciklusa izmjene opterećenja u ovom periodu temeljen na uvjetima rada obuhvaćenim kroz brzinu klizanja na srednjem promjeru (izraz 5.21) i srednji dodirni pritisak (izraz 5.8) može se odrediti pomoću izraza

$$N_{LI} = 10^6 \cdot \left(1 + 0,86 \cdot \ln \left(3 \cdot \frac{v_g}{v_{ref}} \right) \right) \cdot \exp \left[28,078 - 4,666 \cdot \ln \left(520 \cdot \frac{\sigma_{Hm}}{\sigma_{Hlim}} \right) \right] \quad 5.23$$

gdje je $v_{ref}=3$ m/s referentna brzina klizanja [6], v_g brzina klizanja za promatrani slučaj, a σ_{Hlim} granica dodirne izdržljivosti materijala pužnog kola.

Drugi period, karakteriziran prirastom površine oštećene rupičenjem, određen je završetkom prvog perioda s jedne te najvećom površinom rupičenja $A_{P10, max}$ s druge strane. Za zadani dopušteni iznos površine oštećene rupičenjem $A_{P10, max}$ (2...60 %) broj ciklusa izmjene opterećenja N_{LII} može se odrediti pomoću izraza

$$N_{LII} = \frac{(A_{p10, max} - 2) \cdot 10^6}{16,212 \cdot \frac{(\sigma_{Hm} - 180)}{\sigma_{Hlim}} \cdot \exp \left[1,541 \cdot \frac{\sigma_{Hm}}{\sigma_{Hlim}} - 0,581 \cdot \frac{v_g}{v_{ref}} \right]} \quad 5.24$$

gdje se udio površine oštećene rupičenjem uvrštava u postocima.

Valjanost rezultata ocjenjuje se na temelju uvjeta

$$N_{LI} + N_{LII} \leq N_{L(I+II)} \quad 5.25$$

gdje je

$$N_{L(I+II)} = 3 \cdot 10^6 \cdot \frac{v_g}{v_{ref}} \cdot \exp \left[24,924 - 4,047 \cdot \ln \left(520 \cdot \frac{\sigma_{Hm}}{\sigma_{Hlim}} \right) \right] \quad 5.26$$

U trećem se periodu navedenim proračunom pretpostavlja smanjenje udjela površine oštećene rupičenjem zavisno o intenzitetu normalnog trošenja (u općem se dijelu norme navodi da je, nakon pojave inicijalnog rupičenja, moguće povećanje ili smanjenje površine oštećene rupičenjem; ovakav zaključak proizlazi iz praktičnih primjera te ukazuje na složenost uvjeta i nemogućnost obuhvaćanja svih čimbenika u proračunu). Broj ciklusa izmjene opterećenja N_{LIII} može se odrediti pomoću izraza 5.22 za zadani ukupni broj

ciklusa. Navedeni je broj ciklusa N_{LIII} moguće dostići jedino uz uvjet da je sigurnost u odnosu na trošenje S_W dovoljno visoka, odnosno da nije postignuto očekivano istrošenje bokova pužnog kola. Analogno normalnom trošenju i intenzitetu trošenja, za ocjenu sigurnosti kod proračuna obzirom na rupičenje navedene se veličine označavaju s δ_{WPn} i J_{WP} , a potonja određuje pomoću izraza

$$J_{WP} = W_{ML} \cdot W_{NS} \cdot \left[J_{OI} \cdot \frac{N_{LI}}{N_L} + 0,5 \cdot (J_{OI} + J_{OIII}) \cdot \frac{N_{LII}}{N_L} + J_{OIII} \cdot \frac{N_{LIII}}{N_L} \right] \quad 5.27$$

gdje su intenziteti trošenja

$$J_{OI} \equiv J_{OT} \text{ (vidi izraz 5.11) i}$$

$$J_{OIII} = W_p \cdot J_{OI}, \quad 5.28$$

W_{ML} parametar kombinacije materijala i maziva, a W_{NS} parametar intermitencije.

Parametar oštećenja određuje se pomoću izraza temeljenog na parametru debljine uljnog filma (vidi izraz 5.12)

$$W_p = 25 \cdot K_W^{0,75}. \quad 5.29$$

Prikazana je procedura primjenjiva za uvjete pobrojane u tablici 5.6.

Tablica 5.6 Uvjeti primjene proračuna procjene radnog vijeka pužnog para obzirom na rupičenje

Način rada	Neprekidan s uhodavanjem
Srednji dodirni pritisak σ_{Hm}	300...620 N/mm ²
Brzina klizanja v_g	1...7,5 m/s
Osni razmak a	65...160 mm
Prijenosni omjer u	10...20
Srednja visina neravnina R_a	0,4...0,5 μ m
Kombinacija materijala	16MnCr5E / CuSn12Ni2-C-GZ
Podmazivanje	Poliglikol ISO VG 220 na $\vartheta_{ulja}=80^\circ\text{C}$

Prikazani se proračuni nosivosti i radnog vijeka pužnog para obzirom na rupičenje odnose na relativno usko područje primjene temeljeno na laboratorijskim istraživanjima uz pretpostavku pune slike nošenja. Nadalje, poradi nemogućnosti povezivanja pojedinih čimbenika procesi trošenja se razmatraju kao da ne postoji međusobni utjecaj premda je jasno da npr. rupičenje smanjuje udio površine koja je izložena normalom trošenju. Dio proračuna s podacima vezanim uz ovo istraživanje nije dao dobro poklapanje sa vrijednostima utvrđenim mjerenjem. Rupičenje se kod pužnih kola od materijala AlSn6 i CuSn12 pojavilo ranije i pri manjem opterećenju nego je to bilo za očekivati na temelju proračuna. Također, niti u jednom slučaju nije došlo do smanjenja površine oštećene

rupičenjem. Moguće je međutim da se takav trend nije mogao manifestirati jer cilj istraživanja nije bio dostizanje sigurnosti obzirom na trošenje, odnosno odgovarajućeg broja ciklusa opterećenja.

Opsežna ispitivanja pored navedenih vezanih uz trošenje objavio je Huber [2]. Ispitivanja su provedena s relativno malim brojem čimbenika na odabranom referentnom pužnom paru. Obzirom na prirodu procesa stvaranja rupičenja ovakva su ispitivanja neizbježno dugotrajna pa je logična težnja smanjivanja čimbenika uzetih u razmatranje, poglavito onih za koje se smatra da nemaju značajniji utjecaj na navedene procese, praktično je previše složeno za obuhvatiti ih ili njihov utjecaj nije u potpunosti jasan. Nadalje, budući da se pojedini procesi javljaju istodobno, prisutan je i problem odvajanja kako bi se naglasio utjecaj odabranih čimbenika (npr. izolacija prijenosnika i prisilno hlađenje/grijanje ulja kako bi se temperatura držala konstantnom, pročišćavanje ulja kako bi se smanjio ili dokinuo utjecaj abrazije itd.).

Rezultati su poslužili postavljanje veze između površine oštećene rupičenjem i broja promjena opterećenja (vidi izraz 5.30) te formuliranju modela za proračun granične čvrstoće boka pužnog kola obzirom na rupičenje (vidi izraz 5.31).

$$N_p \approx k_N \cdot P_p^{1,5} + N_{p0} \quad 5.30$$

$$\sigma_{H \lim} = \frac{Z_E \cdot Z_\rho \cdot (10^3 \cdot T_2)^{0,5} \cdot a^{-1,5}}{Z_N \cdot Z_V} \quad 5.31$$

U navedenim izrazima, pored okretnog momenta na izlaznom vratilu i osnovog razmaka, ostale značajke imaju sljedeće značenje:

N_p – broj promjena opterećenja,

k_N – konstanta,

P_p – površina oštećena rupičenjem (%),

N_{p0} – broj promjena opterećenja do pojave rupičenja; prema važećoj normi odgovara oznaci N_{LL} ,

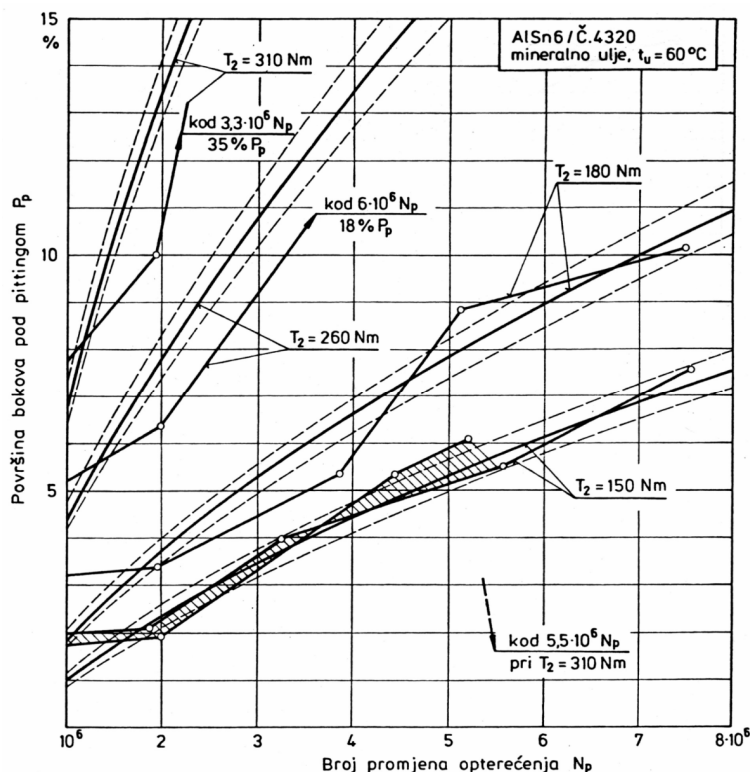
Z_E – ekvivalentni modul elastičnosti; prema važećoj normi odgovara oznaci E_{red} ,

Z_ρ – ekvivalentni polumjer zakrivljenosti; prema važećoj normi odgovara oznaci ρ_{red} ,

$Z_N = \left(\frac{12000}{L_h} \right)^{1/6}$ – faktor trajnosti pogona; prema važećoj normi odgovara oznaci Z_h ,

$Z_V = \sqrt{\frac{2}{2 + v_k^{0,85}}}$ – faktor brzine; prema važećoj normi odgovara oznaci Z_v .

Na temelju rezultata ispitivanja zavisnosti površine oštećene rupičenjem i opterećenja (slika 5.9) za materijal AlSn6 Opalić [4] je prilagodio prethodno navedeni model te izrazio graničnu čvrstoću boka u zavisnosti od površine oštećene rupičenjem.



Slika 5.9 Utjecaj opterećenja na povećanje rupičenjem oštećene površine.
Brzina klizanja $v_k=2,9$ m/s je konstanta.

Za nazivni okretni moment na izlaznom vratilu $T_2=180$ Nm, brzinu vrtnje $n_1=1500$ min⁻¹ i predviđeni radni vijek od 12000 sati te nakon uvrštavanja poznatih vrijednosti izraz poprima oblik

$$\sigma_{H \lim} = 16,4 \cdot \left(2,144 \cdot 10^8 \cdot P_{\text{plim}}^{1,5} + 5 \cdot 10^5 \right)^{1/6}. \quad 5.32$$

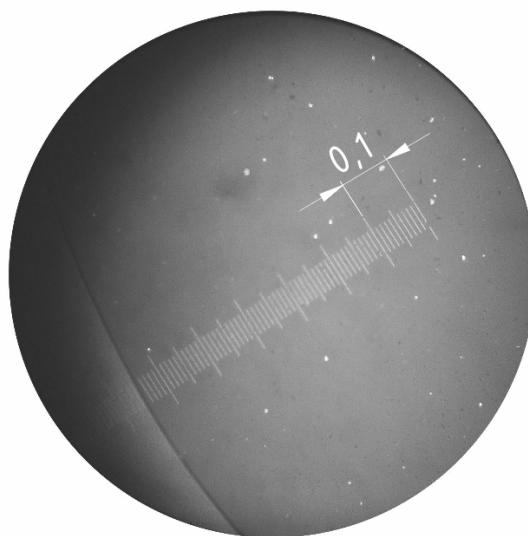
Proračunski postupci i rezultati [2, 4] temelje se na određivanju udjela površine bokova zuba oštećene rupičenjem.

Pored navedenih, u novije se vrijeme pojava rupičenja obrađuje primjenom numeričkih metoda, poglavito konačnim elementima, simulacijama napredovanja pukotine za razne početne uvjete i različite materijale. Često je predmet istraživanja slučaj čelnika s ravnim zubima i evolventnim ozubljenjem gdje su veličine vezane uz geometriju i kinematiku dobro poznate [42, 43, 45, 46]. Modeli daju dobra poklapanja s rezultatima eksperimentalnih istraživanja, kako za geometriju pojedine rupice, tako i za broj promjena prije pojave oštećenja. Poznato je međutim da pužni parovi mogu raditi s visokim udjelima površine oštećene rupičenjem. Dinamika stvaranja rupica od pojave prvih oštećenja do

graničnog udjela u ukupnoj površini koju bi bilo potrebno poznavati radi procjene vijeka trajanja pužnog para kao i veza između rupičenja i drugih mehanizama trošenja do sada nisu obuhvaćeni takvim ili sličnim modelima.

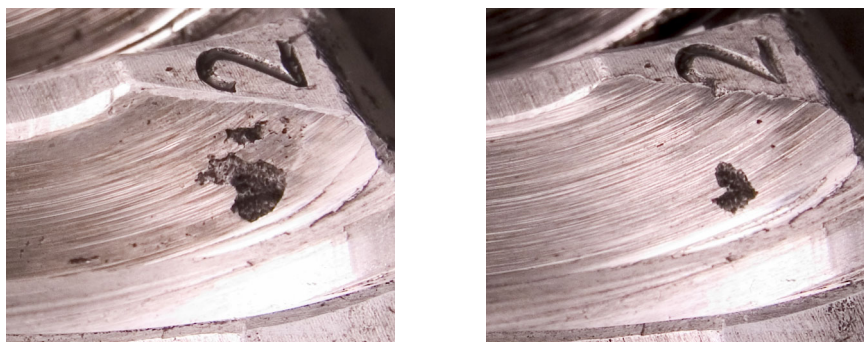
5.1.3 Abrazija

Tijekom ispravnog rada pužnih parova abrazija se ne javlja kao prevladavajuće trošenje. Površine bokova pužnog kola su uglačane, a čestice nastale adhezivnim trošenjem uglavnom su listićastog oblika, po izmjerama reda veličine do $10\text{ }\mu\text{m}$ (slika 5.10).



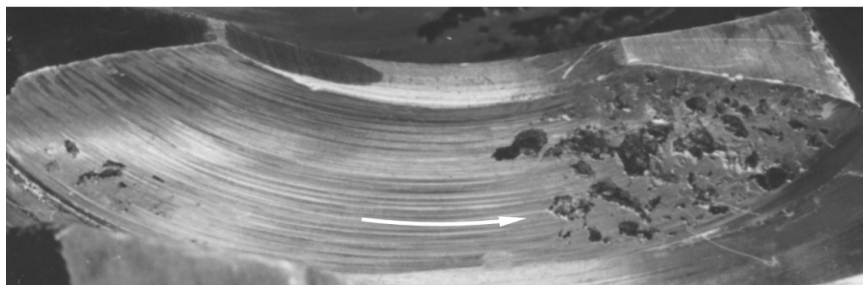
Slika 5.10 Čestice nastale adhezivnim trošenjem; uvećanje 50x, digitalno obrađeno

U slučaju da se tijekom uhodavanja ili redovitog pogona pojave nepravilnosti koje rezultiraju intenzivnim stvaranjem čestica trošenja može abrazivno trošenje postati prevladavajuće [16] (npr. pojačano adhezivno trošenje, onečišćenje sustava maziva česticama iz okoline, prerani umor površine s intenzivnim odvajanjem čestica i sl.). Primjer navedenog slučaja abrazivnog trošenja uslijed preranog umora površine izazvanog pojavom vibracija zbog zračnosti u ležaja vratila puža prikazan je na slici 5.11.



Slika 5.11 Abrazija boka pužnog kola nakon $4,9 \cdot 10^4$ ciklusa uslijed nepravilnosti u pogonu (lijevo prije, desno poslije)

Abrazija se kod pužnih parova često javlja u periodu katastrofalnog istrošenja, odnosno pred sam kraj radnog vijeka. Udio površine oštećene rupičenjem može biti i do 40% ukupne površine boka, a da nije došlo do potpunog gubitka funkcije. Međutim, ako nastupi intenzivno odvajanje čestica materijala s bokova pužnog kola može se pojačati i intenzitet abrazivnog trošenja (slika 5.12).



Slika 5.12 Površina boka zuba pužnog kola s oštećenjima rupičenja i abrazije (strelica označava smjer vrtnje puža)

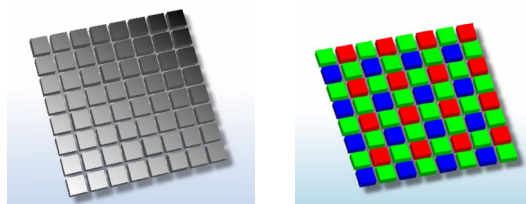
Opisane su vrste trošenja nepoželjne, ali i uobičajene za rad pužnih prijenosnika. Važno je primijetiti da to ne isključuje pojavu i drugih vrsta koje se mogu pojavljivati tijekom rada uzrokovane raznim nepravilnostima. Ukupno je trošenje rezultat složenog parcijalnog djelovanja svake pojedine vrste trošenja, prevladavajuće ili popratne, u pojedinim fazama rada. Prijelazna razdoblja između pojedinih prevladavajućih vrsta trošenja trebaju poslužiti kao naznaka promjena u sustavu.

Digitalna fotografija i formati zapisa

Obzirom na cilj i dinamiku ispitivanja, a napose i na tehnološke mogućnosti modernih fotografskih uređaja, za praćenje promjene udjela rupičenjem oštećenih površina na bokovima zuba pužnog kola predviđeno je snimanje niza digitalnih fotografija visoke razlučivosti digitalnim foto aparatom Olympus C-5050Z (osnovne tehničke osobine nalaze se u prilogu na kraju rada). U ovom su poglavlju date osnove o digitalnoj fotografiji i poznatijim vrstama zapisa u kontekstu odabira najprikladnijeg za provedbu ispitivanja te pretvornicima za obradu digitalnih fotografija.

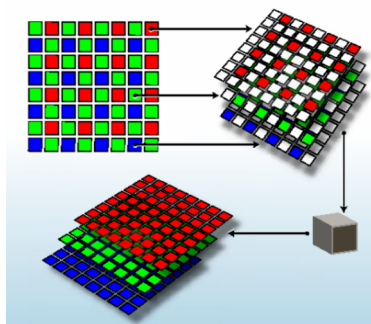
6.1 Digitalna fotografija

Slikanje digitalne fotografije se temelji na istom postupku kao i klasične, analogne, izlaganjem odabranog medija svjetlosti. Dok se kod klasične fotografije svjetlosti izlaže foto-osjetljiva emulzija nanescena na prikladno oblikovanu traku (film), kod digitalnih se uređaja to postiže foto-osjetljivim digitalnim senzorom (CCD – *Charged-Coupled Device* i CMOS – *Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Senzor je podijeljen u stupce i redove, a vlastita razlučivost je određena ukupnim brojem elemenata u polju te predstavlja optimalnu razlučivost uređaja na koji je ugrađen. Dvije su osnovne vrste senzora: jednoslojni i troslojni. Senzori koji se ugrađuju u uređaje široke potrošnje (neprofesionalne, ali i profesionalne uređaje) temelje se na jednoslojnom polju foto-osjetljivih elemenata (CFA – *Colour Filter Array*, odnosno MSA – *Mosaic Sensor Array*) (slika 6.1).



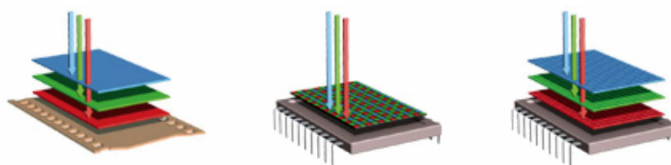
Slika 6.1 Ilustrirani prikaz senzora s Bayer uzorkom polja foto-osjetljivih elemenata

Svaki element u polju predviđen je za interakciju s određenim ograničenim dijelom spektra svjetla te inducira jednu vrijednost (slika 6.2). Budući da svaki element polja daje podatak samo za određeni dio spektra, informacija o objektu nije cjelovita. Konačan rezultat dobije se pogađanjem (interpolacijom) preko šireg područja elemenata, odnosno između elemenata istog spektra, a na temelju individualnih vrijednosti. Rezultat postupka zavisi o uzorku senzora i kvaliteti implementiranog algoritma (*demosaic algorithm*) te je jasno da nastala slika predstavlja interpretaciju objekta slikanja.



Slika 6.2 Postupak nastanka digitalne fotografije uporabom mozaik senzora

Troslojni¹¹ su senzori, prema principu rada, prava zamjena klasičnog filma. Naime, za razliku od jednoslojnih mozaik senzora, uporabom troslojnih senzora moguće je odrediti tri vrijednosti na svakom elementu polja propuštanjem ili zaustavljanjem (registriranjem) dijela spektra na određenom sloju. Ovakvim se načinom prikuplja točnija informacija o objektu snimanja, odnosno razdiobi osvijetljenosti i kromatizma¹².

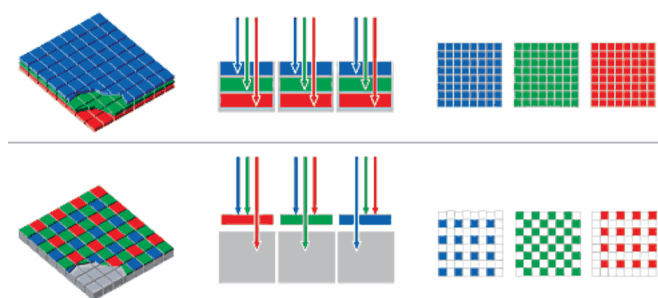


Slika 6.3 Princip rada klasičnog filma, mozaik senzora i troslojnih senzora

Usporedba jednoslojnog mozaik (Bayer uzorak) i troslojnog senzora najbolje ilustrira razliku u konačnom rezultatu digitalne fotografije (slika dolje)

¹¹ Foveon X3® Direct Image Sensor je prvi troslojni senzor u praktičnoj primjeni, <http://www.foveon.com/>

¹² Kromatizam (*klas. eur.*) svojstvo bijele zrake da se razlaže na zrake različitih boja, Rječnik hrvatskog jezika, V. Anić; u kontekstu digitalne fotografije određuje se kao umnožak obrađenih vrijednosti R, G i B za jedan element.



Slika 6.4 Troslojni senzor (gore) i mozaik senzor (dolje)
mozaik senzor registrira samo po 25% od plavog i crvenog te 50% zelenog spektra.

6.2 Formati zapisa digitalne fotografije

Oblik u kojemu će digitalna fotografija biti zapisana uvelike određuje i kvalitetu prikaza, ali i mogućnost naknadne obrade. Datoteke digitalnih fotografija obično se zapisuju u sažetom, komprimiranom obliku, pa u tom smislu i razlikujemo dvije osnovne vrste [47]:

- zapis bez gubitka kvalitete fotografije (u daljnjem tekstu *lossless*) uz relativno skromno smanjenje veličine datoteke,
- zapis s mogućnosti određivanja omjera kvalitete i veličine (u daljnjem tekstu *lossy*), gdje je kvaliteta fotografije proporcionalna veličini datoteke.

Radi boljeg razumijevanja odabranog formata uspoređene su karakteristike nekoliko popularnih vrsta zapisa:

- JPEG, JPG (*Joint Photographic Experts Group*) je standardni oblik *lossy* zapisa implementiran na većini modernih digitalnih foto aparata. U novije vrijeme se primjenjuje i u *lossless* inačici, ali ista još nije široko podržana od strane proizvođača grafičkih programskih paketa. Ovaj oblik zapisa ima negativnu osobinu „generacijske degradacije“, odnosno gubitak kvalitete uslijed opetovanog uređivanja i spremanja uz uporabu *lossy* zapisa. JPEG format može pohraniti 256 nijansi po boji i slikovnom elementu (pikselu¹³) (približno $16,7 \cdot 10^6$ nijansi boja).
- BMP (*Bit Mapped*) je interni oblik zapisa u *Microsoft Windows* okruženju te uglavnom nije podržan na digitalnim foto aparatima.
- TIFF (*Tagged Image File Format*) je prilagodljiv oblik zapisa s obje navedene mogućnosti sažimanja. Postoji više različitih inačica koje nisu nužno podržane čak niti na uobičajenim grafičkim programskim paketima. Kao i kod prethodno navedenih, digitalna fotografija snimljena uređajem s *MSA* senzorom zapisuje se nakon postupka interpolacije.

¹³ složenica za slikovni element (*picture element - pixel*). Digitalna se slika sastoji od polja točaka. Gustoća točaka prikazane slike ili rezolucija se izražava brojem točaka po jedinici duljine (*pixels per inch - ppi*). Većina grafičkih programskih paketa rezoluciju određuje kvalitetom tiskane fotografije (*dots per inch - dpi*).

- *RAW* oblik zapisa [48] nije standardiziran te također dolazi u različitim inačicama, uglavnom prema internim normama poznatijih proizvođača digitalnih foto aparata i kamera. Pripada *lossless* grupi zapisa, a od ostalih se razlikuje prema vrsti podataka koje pohranjuje. Naime, ostali uobičajeni oblici sadrže već interpoliranu i obrađenu sliku, dok *RAW* bilježi sirove, nesažete i neobrađene podatke direktno sa senzora uključujući pri tome i podatke o postavkama na samom uređaju (ekspozicija, kontrast, zasićenje, itd.). U tom se smislu ovaj oblik zapisa može usporediti sa snimljenim, ali ne i razvijenim klasičnim filmom. Uporabom odgovarajućih programskih paketa (s ili bez grafičkog sučelja) ovi se podaci mogu dodatno obraditi kako bi se polučili kvalitetniji rezultati, a postupak je moguće ponavljati bez utjecaja na izvorne podatke. Bitno je naglasiti da je podatke dobivene fotografiranjem s pogrešno odabranim parametrima moguće doraditi u određenim granicama, ne nužno i zadovoljavajućim. *RAW* format može pohraniti 4096 nijansi po boji i pikselu (približno $68,7 \cdot 10^9$ nijansi boja) pa pripadne datoteke u pravilu zauzimaju više prostora na tvrdom disku te su zahtjevnije tijekom obrade.

Premda su uvjeti u kojima se praćenje provodi laboratorijski daleko su od povoljnih kada je riječ o fotografiranju. Naime, nekoliko je otegotnih okolnosti na koje treba obratiti pažnju prilikom odabira najpogodnijeg oblika zapisa imajući u vidu ukupni postupak obrade digitalne fotografije prije nego se poluče konkretni podaci:

- prijenosnik neće biti rastavljan kako ne bi došlo do promjene međusobnog položaja dijelova. Naime, uzimanje većeg broja fotografija, kao preduvjet kontinuiranog praćenja promjena na bokovima zuba, implicira veći broj demontaža i montaža, a time i povećava mogućnost promjene uvjeta za bilo koji od promatranih dijelova. Odabrane bokove je stoga potrebno fotografirati unutar prijenosnika gdje su uvjeti za kvalitetno osvjetljenje nepovoljniji (vidi sliku prijenosnika),
- površine bokova izložene trošenju sjajne su metalne površine koje će reflektirati susjedne površine pa je poželjna mogućnost naknadne obrade fotografija,
- oblik, veličina i smještaj ispitnog postolja su takvi da može postojati znatan utjecaj okolnog osvjetljenja.

Obzirom na cilj ispitivanja i dimenzije oštećenja koja se želi pratiti te imajući u vidu tehnologiju snimanja digitalnih fotografija, odabran je *RAW* oblik zapisa budući da u potpunosti ispunjava postavljene zahtjeve te pruža najveću slobodu prilikom obrade slike.

Bez obzira na činjenicu da je digitalna fotografija snimljena uređajem s *MSA* senzorom te da se dio podataka o objektu snimanja gubi već u prvom dijelu postupka (snima se po 25% crvenog i plavog, te 50% zelenog spektra), konačni rezultat u odnosu na klasičan film treba sagledati i kroz aspekte obrade slike. Naime, priprema klasične fotografije do oblika pogodnog za računalnu obradu uključuje odabir odgovarajuće kvalitete filma, razvijanje i

prevođenje u digitalni oblik zapisa, od kojih su postupaka neki sami po sebi osjetljivi obzirom na održanje kvalitete.

Senzor digitalnog foto aparata Olympus C-5050Z čini polje elemenata 2560*1920. Veličina fotografije u *RAW* obliku zapisa odgovara veličini senzora aparata. Za rezoluciju fotografija je odabrano 300 dpi, odnosno približno 11,811 piksela/mm. Uz navedene se vrijednosti postiže fotografija približnih dimenzija 216,75*162,56 mm.

6.3 Pretvornici i alati za obradu fotografije

U izradi fotografije pogodne za digitalnu obradu, pored mogućnosti digitalnog fotoaparata, odlučujući su čimbenici svojstva površine koja se fotografira te uvjeti osvjetljenja (vidi poglavlje br. 8). Površine boka oštećene rupičenjem razlikuju se u teksturi i intenzitetu refleksije od ostatka površine boka zuba pa se pogodnim, diskretnim osvjetljenjem mogu naglasiti njihovi rubovi te omogućiti daljnja obrada pomoću pojedinih pretvornika i alata ili njihovih kombinacija.

Budući da u raznim grafičkim paketima pojedini pretvornici i alati imaju različite nazive, a često i mogućnosti, opisani su prema namjeni odnosno djelovanju, pod nazivom uobičajenim za većinu programskih paketa (ako takav naziv postoji). Među pretvornicima predviđenim za uporabu nalaze se sljedeći:

- Maska, odabir ili sloj – alat kojim se odabire ili izdvaja dio fotografije nad kojim se želi provesti određeni zahvat.
- Oblik zapisa – pretvornik kojim se mijenjaju osobine fotografije obzirom na broj i vrstu boja koje je sačinjavaju. Među popularnim oblicima zapisa nalaze se *Black-and-White*, *Grayscale* (8 ili 16 bita po pikselu), *Paletted*, *RGB* (24 ili 48 bita po pikselu), *CMYK* itd. [47]
- Jačina osvjetljenja – pretvornik kojim se određuje iznos svjetla kojemu je izložen ili koje je reflektirano od pojedinog piksela. Rasponi odabira se mogu razlikovati, a u pravilu postavljanje najniže vrijednosti rezultira crnom bojom, dok postavljanje najviše rezultira bijelom.
- Kontrast – pretvornik kojim se podešava razlika u tonu između svijetlih i tamnih područja. Viši kontrast odgovara većoj razlici.
- Množitelj – pretvornik množi vrijednosti boja dvaju piksela prema algoritmu koji za rezultat daje nijansu ili boju tamniju od obje osnovne.
- Prag tolerancije nijansi – određuje koliko se nijansi određene boje pretvara u bijelu ili crnu (kod fotografija s nijansama sive).
- Uklanjanje šuma ili čestica – pretvornik kojim se iz fotografije mogu odstraniti pojedini pikseli ili grupe, zavisno od mogućnosti i postavki u okviru pojedinog programskog paketa.

- Zatvaranje objekata – alat kojim se na temelju postavki provodi spajanje bliskih bridova analizirane fotografije.
- Popunjavanje praznina ili otvora – alat kojim površina omeđena pikselima određene boje ili binarnog stanja (nula ili jedan) prevodi u istu boju ili stanje.
- Određivanje granice ili konture – alat kojim se određuje kontura neke površine.
- Uklanjanje rubnih objekata – alat kojim se iz fotografije mogu odstraniti svi pikseli direktno povezani s njezinim rubovima.
- Analiza fotografije – alat ili skupina alata kojima se mogu analizirati pojedini obrisi ili površine na fotografiji (broj piksela ili površina, kontura, itd.).

Prema primjeni za određeni oblik zapisa može ih se podijeliti u četiri grupe:

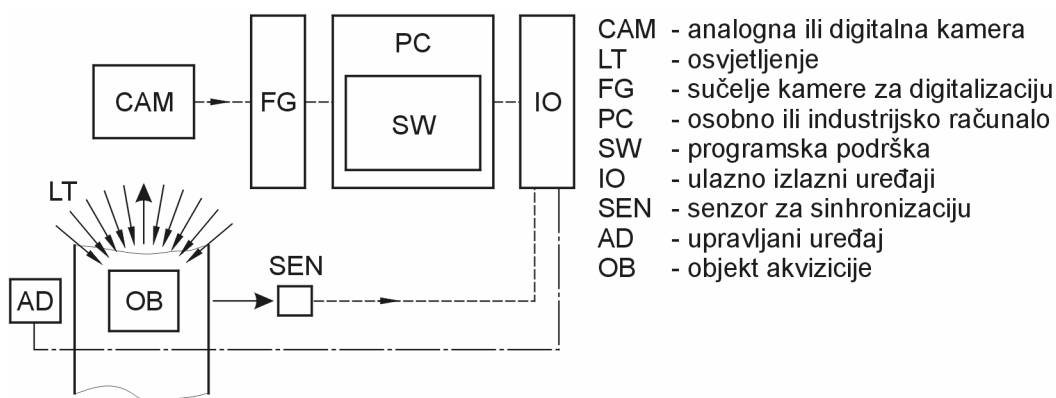
- općenito za obradu fotografije,
- za obradu fotografija u boji,
- za obradu fotografija sivih tonova i
- za binarnu obradu.

Svi pretvornici ili alati nisu primjenjivi za sve oblika zapisa. Većina je sadržana u većini grafičkih programskih paketa, dok su neki svojstveni posebnim paketima za analizu digitalnih fotografija. Zavisno od paketa, korisniku je omogućena i određena razina automatizacije, bilo da je riječ o mogućnosti izrade i pohrane osobnih programskih sekvenci ili programiranju u nekom od podržanih programskih jezika. Kako cilj ovoga rada nije ocjena primjenjivosti ili usporedba mogućnosti grafičkih programskih paketa već njihova praktična uporaba u svrhu istraživanja određene pojave isti se neće eksplicitno navoditi.

6.4 Računalni i strojni vid

Ljudski vid ima nezaobilaznu ulogu u procesima vezanim uz proizvodnju, konstrukciju, kontrolu itd. Zahtjevi koji se postavljaju u modernoj industriji u mnogočemu nadilaze njegove sposobnosti: brzine kojima se odvijaju pojedini procesi, detalji koji igraju ključnu ulogu kod nekog proizvoda, točnosti koje treba postići te količina podataka koje treba obraditi nametnuli su potrebu za drugačijim oblikom interakcije. Kao alternativa ljudskom vidu razvija se sustav strojnog vida.

Strojni vid je primjena računalnog vida, uglavnom u industriji i proizvodnji, a u novije vrijeme i na drugim područjima (znanosti, transportu, sigurnosti, medicini itd.). Dok je računalni vid primarno namijenjen računalnoj obradi digitalne slike, strojni vid podrazumijeva ulazno/izlazne uređaje i prateću infrastrukturu kako bi omogućio nadzor i/ili upravljanje drugom opremom i/ili procesima. U tom je smislu strojni vid područje koje objedinjuje znanost o računalima, optiku, strojarstvo i industrijsku automatizaciju. Primjer jednostavnog sustava strojnog vida prikazan je na slici 6.5.



Slika 6.5 Shematski primjer izvedbe sustava strojnog

Rad sustava se realizira interakcijom ulaznih jedinica (digitalna ili analogna kamera (CAM) i senzora (SEN)) preko računalne i programske podrške (PC, SW) s možebitnim upravljanim uređajima (AD). Uobičajeni dijelovi opreme su također i sučelje kamere za digitalizaciju (FG) te ulazno/izlazni uređaji (IO) i veze. Senzor daje informaciju o potrebi akvizicije upravljačkom programu koji inicira rad kamere. U slučaju gdje kamera radi neprekidno program inicira rad sučelja za digitalizaciju koji vraća fotografiju ili niz fotografija (*frame*¹⁴-ova). Niz preuzima namjenski program za obradu te, u skladu s podešenim parametrima, pokreće upravljani uređaj ili provodi neku drugu radnju. Uređaji novije generacije mogu zamijeniti pojedine komponente (primjerice kamera s ugrađenim sučeljem za digitalizaciju), ali se sustav opet može svesti na prikazane komponente. Primjer integriranog sustava predstavlja tzv. pametna kamera u kojoj su integrirane optička komponenta, sučelje za digitalizaciju, DSP¹⁵ procesor i ulazno/izlazna komponenta.



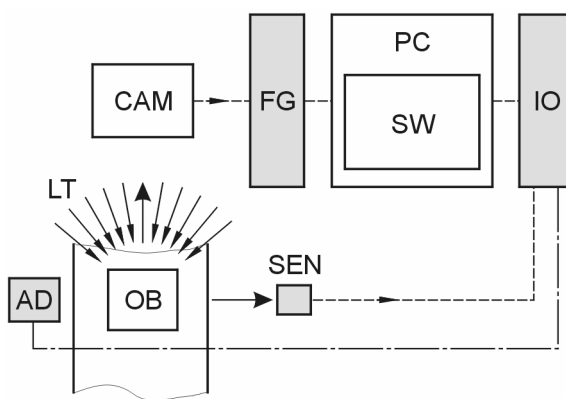
Slika 6.6 Pužno kolo AlSn6 za vrijeme rada

Opisani sustav je pogodan za rad u dinamičkom ili statičkom okruženju. Za potrebe istraživanja u ovom radu ovakav je sustav preformuliran jer ima komponente čije funkcije

¹⁴ Frame [engl.] – filmska slika, okvir, uramiti, uokviriti

¹⁵ DSP – digital signal processing

nije moguće koristiti. Naime, objekt akvizicije, u ovom slučaju bok zuba pužnog kola, nije moguće snimiti bez odgovarajuće pripreme. Tijekom rada prijenosnik se podmazuje, a uslijed čestica trošenja ulje može biti neprozirno (slika 6.6). Nadalje, ulje je viskozno, konstruirano na način da dobro prijanja na metalnu podlogu pa onemogućava direktno slikanje površine boka. Iz navedenih razloga pogon mora biti zaustavljen, a bokovi zuba obrisani. U tom smislu, nema potrebe za senzorom kao niti upravljanim uređajem. Također, budući da nema potrebe za komunikaciju s periferijom suvišan je i ulazno/izlazni uređaj. Budući da nema dinamičke promjene stanja nije nužno koristiti kameru već je dostatan i digitalni fotoaparat što opet ukida potrebu za sučeljem za digitalizaciju. Ovako reduciran sustav svodi se dakle na digitalni fotoaparat, sustav osvjetljenja, osobno ili industrijsko računalo te programsku podršku (slika 6.7).



Slika 6.7 Reducirani sustav strojnog vida

Odabir osvjetljenja koje treba primijeniti na objekt akvizicije predstavlja važan čimbenik u radu sustava strojnog vida. Fotografija načinjena u uvjetima lošeg ili pogrešno odabranog osvjetljenja može dati ne samo nekvalitetan već i pogrešan podatak. Najbolja slika za sustav je ona koja ističe područje interesa te sve očekivane osobine. Način odabira osvjetljenja opisan je u poglavlju 8.3.

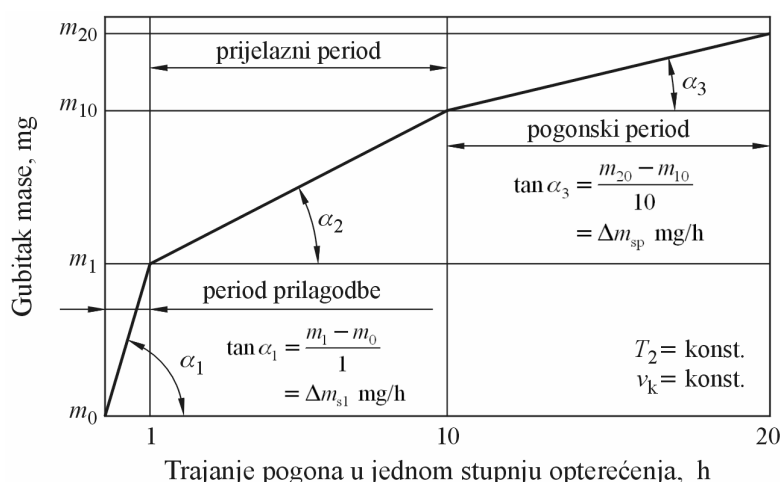
Greške metode

Metoda određivanja površina na fotografiji, analognoj ili digitalnoj, povlači sa sobom i određeni broj grešaka. Pored neizvjesnosti vezane uz princip djelovanja digitalnog foto aparata prisutne su još sljedeće:

- određivanje površine zuba,
- prikrata površine i
- distorzija.

7.1 Određivanje površine zuba

Nazivna aktivna površina boka zuba pužnog kola preko koje se prenosi opterećenje određena je tjemnim promjerima puža i pužnog kola, vanjskim promjerom i širinom pužnog kola te profilom. Stvarna je površina dinamička veličina, jednaka ili manja od nazivne, zavisno od nametnutog opterećenja. Jednom opterećenju odgovara ravnotežno stanje elemenata sustava (elastične deformacije vratila i zuba puža i pužnog kola, podešavanje ležaja) i pripadna slika nošenja. Prilikom promjene opterećenja mijenja se i ravnotežno stanje, opterećenje se prenosi preko površine koja je manja od odgovarajuće za pripadne uvjete pa se bokovi zuba pužnog kola pojačano troše. Dijagram na slici 7.1 prikazuje kvalitativno dinamiku trošenja nakon povećanja opterećenja [4].



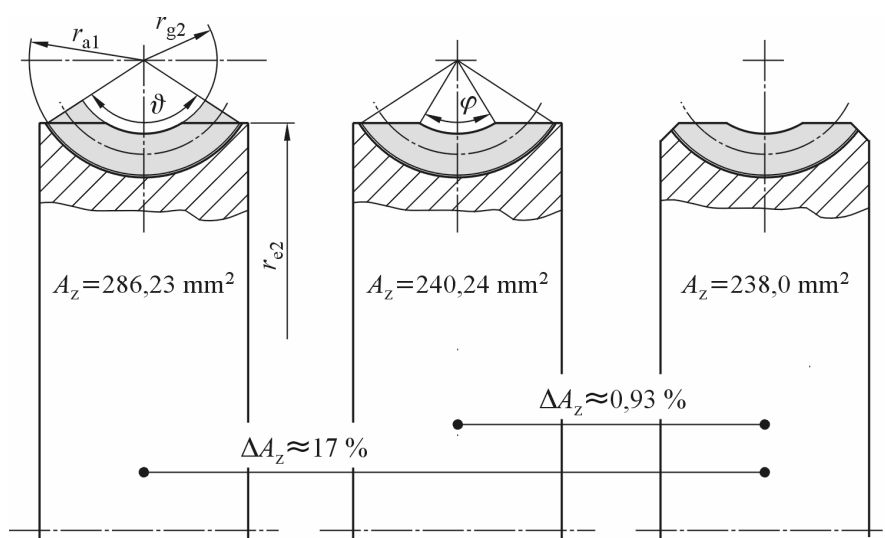
Slika 7.1 Shematski prikaz perioda kliznog istrošenja u jednom stupnju opterećenja

Modeli za proračun približne aktivne površine boka zuba pužnog kola prikazani u nastavku ne obuhvaćaju utjecaj opterećenja na deformacije pojedinih elemenata sustava, a time niti utjecaj na veličinu površine.

Za određivanje udjela površine bokova zuba pužnog kola oštećenih rupičenjem potrebno je poznavati ukupnu površinu zuba koja sudjeluje u zahvatu. Približna površina boka jednog zuba pužnog kola može se izračunati preko površine projekcije zuba na čeonu ravninu [2, 6, 7]. Površina projekcije je određena tjemnim promjerima puža i pužnog kola te aktivnom širinom pužnog kola (vidi poglavlje br. 2), a uz uvođenje određenih pojednostavljenja može se izraziti u obliku

$$A_{lz_2}^* \approx \frac{d_1 \pi m \cdot \arcsin \frac{b_2}{d_1 + 2m}}{90}. \quad 7.1$$

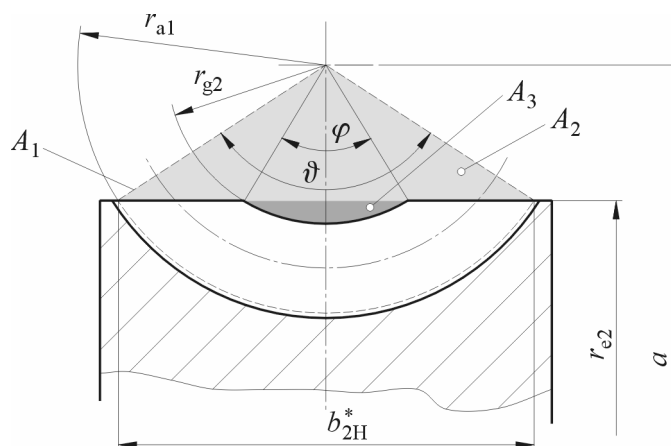
Primijenjeni na pužni par iz [2] izrazima se dobije greška od 2,5% u odnosu na površinu određenu izravno na ravninskom modelu za zadane dimenzije. U slučaju pužnih parova korištenih u ovom istraživanju, poglavito za pužno kolo načinjeno od materijala AlSn6, već se izrazom za površinu projekcije boka zuba čini greška od približno 17% u odnosu na površinu pripadnog ravninskog modela (slika 7.2, desno). Razlog tomu leži u činjenici da izrazom nije obuhvaćen vanjski promjer pužnog kola d_{e2} pa je za projekciju boka uzeta površina isječka kružnog vijenca (slika 7.2, lijevo). Može se zaključiti da navedeni model nije podesan za općenit izračun približne površine boka zuba pužnog kola budući da ne uzima u obzir geometrijske razlike. Važeća norma za proračun nosivosti pužnih parova [6], kao i nacrt nove [7], u kojima se površina bokova zuba pužnog kola određuje pomoću izraza temeljenog na navedenim, ne daju ograničenja vezano uz njegovu uporabu glede različitih izvedbi pužnih kola. Poradi utvrđene velike greške navedeni model nije podesan za izračun površine boka zuba te je načinjen novi.



Slika 7.2 Određivanje približne površine projekcije boka zuba pužnog kola
lijevo – prema [2], sredina – model pužnog kola od AlSn6,
desno – projekcija boka zuba u skladu s geometrijom pužnog kola od AlSn6

Obzirom da je geometrija pužnih kola poznata (vidi poglavlje 2 i 8) novim će se modelom obuhvatiti sve potrebne dimenzije kako bi se smanjila greška obzirom na pripadni ravninski model. Posebnost izvedbe, poglavito skošenje rubova, ovim modelom nije uzeto u obzir. U tom smislu, a u skladu s geometrijom pužnog kola, definiraju se tri površine:

- A_1 – površina kružnog isječka (slika 7.3, crtkani obris),
- A_2 – površina trokuta i
- A_3 – površina kružnog odsječka.



Slika 7.3 Definiranje parcijalnih površina pomoću dimenzija pužnog para

Približna površina projekcije boka zuba pužnog kola određena je odnosom navedenih površina:

$$A_{1z_2}^* = A_1 - (A_2 + A_3). \quad 7.2$$

Za potrebu definiranja površina potrebno je odrediti pojedine karakteristične veličine uvjetovane geometrijom. Kut koji zatvaraju zrake kružnog isječka površine A_1 određen je izrazom

$$\vartheta = 2 \cdot \arccos \frac{a - r_{e2}}{r_{a1}}, \quad 7.3$$

a kut između zraka kružnog odsječka površine A_3 izrazom

$$\varphi = 2 \cdot \arccos \frac{a - r_{e2}}{r_{g1}}. \quad 7.4$$

Tetiva kružnog isječka (koja se razlikuje od definicije aktivne širine boka b_{2H} , vidi poglavlje br. 2) određena je sa

$$\frac{b_{2H}^*}{2} = (a - r_{e2}) \cdot \tan \frac{\vartheta}{2}. \quad 7.5$$

Pojedine površine određene su sljedećim izrazima:

$$A_1 = r_{al}^2 \cdot \pi \cdot \frac{\vartheta}{360}, \quad 7.6$$

$$A_2 = (a - r_{e2}) \cdot \frac{b_{2H}^*}{2} = (a - r_{e2})^2 \cdot \tan \frac{\vartheta}{2} = \frac{r_{al}^2}{2} \cdot \sin \vartheta, \quad 7.7$$

$$A_3 = \frac{r_{g2}^2}{2} (\varphi - \sin \varphi) = \frac{r_{al}^2}{2} \cdot \left(\frac{\cos(\vartheta/2)}{\cos(\varphi/2)} \right)^2 \cdot (\varphi - \sin \varphi) \quad 7.8$$

pa se ukupna približna površina projekcije boka zuba pužnog kola u čeonj ravlini može odrediti izrazom

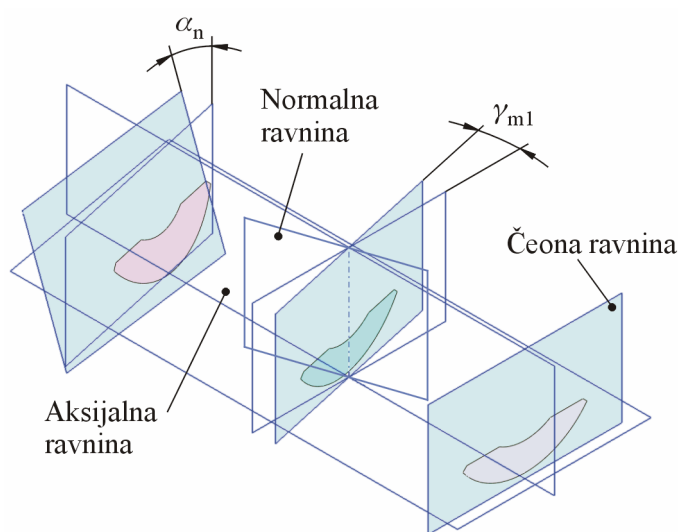
$$A_{Iz_2}^* = \frac{r_{al}^2}{2} \cdot \left[\frac{\pi \cdot \vartheta}{180} - \sin \vartheta - \left(\frac{\cos(\vartheta/2)}{\cos(\varphi/2)} \right)^2 \cdot (\varphi - \sin \varphi) \right]. \quad 7.9$$

Za slučaj pužnog kola od materijala AlSn6 korištenog tijekom ispitivanja navedenim se izrazom postiže greška od približno 1% (slika 7.2, sredina).

Približna površina boka zuba se prema [2, 6, 7] može odrediti pomoću izraza

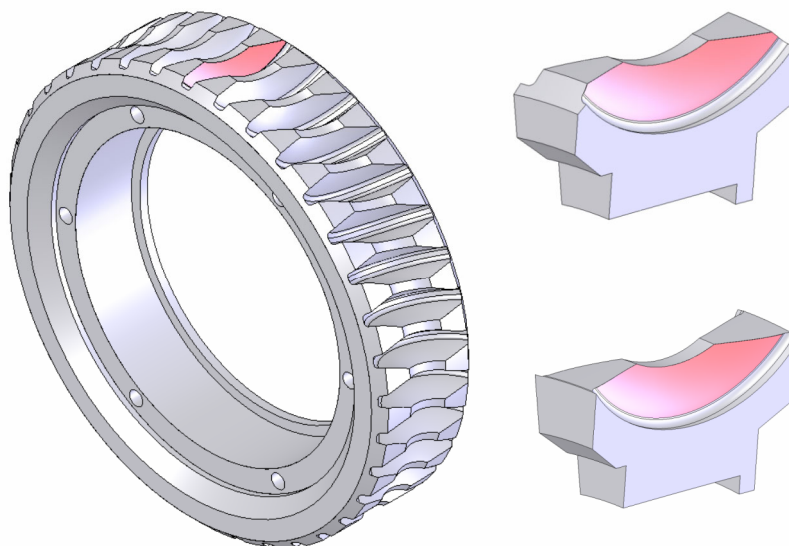
$$A_{Iz_2} \approx \frac{A_{Iz_2}^*}{\cos \gamma_m \cdot \cos \alpha_n}. \quad 7.10$$

Geometrijska predodžba ovog izraza je projekcija površine zuba iz čeonj ravnine na ravninu otklonjenu od čeonj za srednji kut uspona (okomita na normalnu ravninu) te konačno na ravninu otklonjenu od potonje za normalni kut zahvatne crte (slika 7.4).



Slika 7.4 Projekcija površine zuba iz čeonj ravnine

U cilju određivanja stvarne površine boka zuba pužnog kola izrađen je pomoću prikladnog parametarskog 3D programskog paketa računalni model pužnog kola čije dimenzije i geometrijske značajke odgovaraju pužnom kolu načinjenom od materijala AlSn6 (slika 7.5).



**Slika 7.5 Model pužnog kola od AlSn6 (lijevo),
površina boka zuba pužnog kola sa skošenjem (desno gore) i bez skošenja (desno dolje)**

Aktivna površina boka zuba pužnog kola određena je za izvedbu sa i bez skošenja (potonja odgovara prikazanom novom modelu za proračun približne površine pomoću projekcije u čeonj ravnini). U oba su slučaja izmjerene vrijednosti manje obzirom na dobivene izrazom 7.10, odnosno stvarne površine bokova su manje od približno izračunatih. Obzirom da je površina boka zakrivljena za očekivati bi bilo da je odnos vrijednosti suprotan (prema [2] dobiveni je rezultat približne površine dodatno trebalo uvećati za 10%). Jednostavno je međutim utvrditi da se navedena razlika pojavljuje zbog uporabe srednjeg kuta uspona γ_{m1} u izračunu približne površine boka zuba pužnog kola. Kut uspona se mijenja zavisno od koraka i promjera, a korak je funkcija promjera i geometrije boka.

$$\tan \gamma = \frac{p}{2r\pi}. \quad 7.11$$

Srednji kut uspona je prema tome

$$\tan \gamma_{m1} = \frac{p_{z1}}{d_{m1}\pi} = \frac{m_{x1} \cdot z_1}{d_{m1}} = \frac{z_1}{q_1}, \quad 7.12$$

a kut γ_i uspona na bilo kojem promjeru d_i

$$\tan \gamma_i = \frac{p_{zi}}{d_{i1}\pi}. \quad 7.13$$

Premda se korak u aksijalnoj ravnini mijenja s promjerom pokazalo se za profil ispitivanih pužnih kola da razlika nema značajan utjecaj na veličinu kuta uspona. Stoga je, radi pojednostavljenja, uzeto da je korak u aksijalnoj ravnini konstantan po visini polja zahvata. Model za proračun parcijalnih projekcija uzima u obzir vanjski promjer pužnog kola, a temelji se na prirastu polumjera za neku odabranu vrijednost Δr . Zbog jednostavnijeg postupka greška modela O (slika 7.6) se neće uzimati u obzir, poglavito i radi toga što njezina vrijednost pada ako $\Delta r \rightarrow 0$.

Model obuhvaća sljedeće izraze:

$$\text{obuhvatni kut } \vartheta_i = 2 \cdot \arccos \frac{a - r_{e2}}{r_i}, \quad 7.14$$

$$\text{sljedeći polumjer } r_{i+1} = r_i + \Delta r, \quad 7.15$$

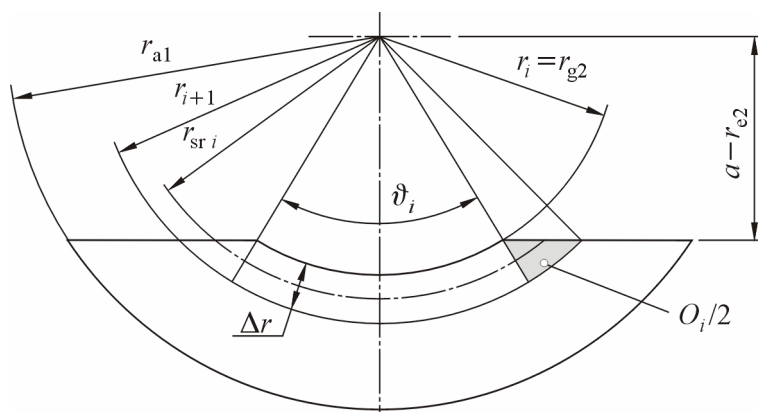
$$\text{parcijalna površina projekcije } A_i^* = (r_{i+1}^2 - r_i^2) \cdot \pi \cdot \frac{\vartheta_i}{360} + O_i, \quad 7.16$$

$$\text{srednji polumjer iteracije } r_{sri} = \frac{r_{i+1} + r_i}{2}, \quad 7.17$$

$$\text{kut uspona na srednjem polumjeru } \tan \gamma_i = \frac{p_{x1}}{2\pi r_{sri}}, \quad 7.18$$

$$\text{parcijalna površina } A_i = \frac{A_i^*}{\cos \alpha_n \cdot \cos \gamma_i}, \quad 7.19$$

$$\text{ukupna površina } A = \sum_i A_i = \frac{1}{\cos \alpha_n} \sum_i \frac{A_i^*}{\cos \gamma_i}. \quad 7.20$$



Slika 7.6 Model za određivanje parcijalnih površina

Izvadak rezultata proračuna provedenog za pužno kolo bez skošenja (slika 7.5, desno dolje) prikazani su u tablici 7.1. Suma projekcije površina $\sum A_i^*$ razlikuje se od točne vrijednosti (slika 7.2, sredina) za manje od 0,2% što predstavlja odbačenu grešku modela.

Tablica 7.1 Rezultati proračuna površina obzirom na kut uspona uz $\Delta r=0,05$ mm.

r_i, r_{i+1}	ϑ_i	A_i^*	$r_{sf i}$	γ_i	A_i
14,00	62,01	0,759	14,03	8,12	0,816
14,05	62,68	0,770	14,08	8,09	0,828
14,10	63,34	0,781	14,13	8,06	0,839
14,15	64,00	0,792	14,18	8,03	0,851
14,20	64,64	0,802	14,23	8,00	0,862
...					
...					
21,80	113,20	2,156	21,83	5,24	2,304
21,85	113,38	2,164	21,88	5,22	2,313
21,90	113,55	2,173	21,93	5,21	2,322
21,95	113,72	2,181	21,98	5,20	2,330
$\sum A_i^*$		239,851			
$A = \frac{\sum A_i^*}{\cos \gamma_m \cdot \cos \alpha_n}$		261,471	$A = \frac{1}{\cos \alpha_n} \sum_i \frac{A_i^*}{\cos \gamma_i}$		256,779

Površina izmjerena na modelu pužnog kola bez skošenja iznosila je približno 258,6 mm². Razlika u odnosu na vrijednost dobivenu modelom parcijalnih površina iznosi približno 0,7%, a posljedica je pretpostavki načinjenih radi pojednostavljenja. Površina određena pomoću srednjeg kuta uspona veća je od površine izmjerene na modelu za približno 1,3%. Pregled rezultata dobivenih različitim metodama dat je u tablici 7.2.

Tablica 7.2 Usporedba pojedinih rezultata i izmjerenih veličina (površine u mm²)

Površina projekcije u čeonj ravlini	Prema [2][6][7]	Prema izrazu 7.9 i ravninskom modelu		
	298	240,24		
Površina boka zuba	Prema [2][6][7]	Projekcijom za srednji kut uspona	Projekcijom za parcijalni kut uspona	Izmjereno na računalnom 3D modelu
	324,9	261,5	256,8	258,6

Uporabom izraza 7.9 umjesto navedenih prema [6] i [7] može se točnije odrediti površina projekcije boka zuba pužnog kola u čeonj ravlini. Površina boka se može odrediti pomoću srednjeg kuta uspona uz približnu grešku od 0,8% obzirom na površinu izmjerenu na računalnom 3D modelu. Ovako dobivena vrijednost manja je od izračunate prema [6] za približno 19,5%. Obzirom na malu razliku između rezultata dobivenog pomoću načinjenog analitičkog modela i izmjerene vrijednosti na računalnom modelu mogao bi se analitički model koristiti kod pužnih kola geometrije slične ispitivanima.

7.2 Prikrata površine

Fotografija je projekcija predmeta snimanja na ravninu okomitu na os objektiva. U slučaju da os objektiva nije paralelna s normalom promatrane površine (npr. kod planarnih površina) fotografiji površine će biti manja od stvarne odnosno prikraćena. Omjer stvarne i projicirane površine predstavlja faktor prikrate.

Bok zuba pužnog kola zakrivljena je prostorna površina gdje se smjer normale na površinu kontinuirano mijenja. Posljedica toga je da su pojedini dijelovi površine projicirani s različitim prikratama, odnosno s toliko različitih prikrata koliko različitih kutova pojedine normale zatvaraju s osi objektiva. Kako bi točnije odredili stvarnu površinu boka zuba oštećenu rupičenjem potrebno je utvrditi za koliko je fotografirana površina prikraćena obzirom na stvarnu. Obzirom da se ovaj rad temelji na određivanju udjela površine boka zuba pužnog kola oštećene rupičenjem snimanjem digitalnih fotografija iznos prikrate će se također odrediti analizom pojedinih fotografija te usporedbom s odgovarajućim grafičkim 3D modelom.

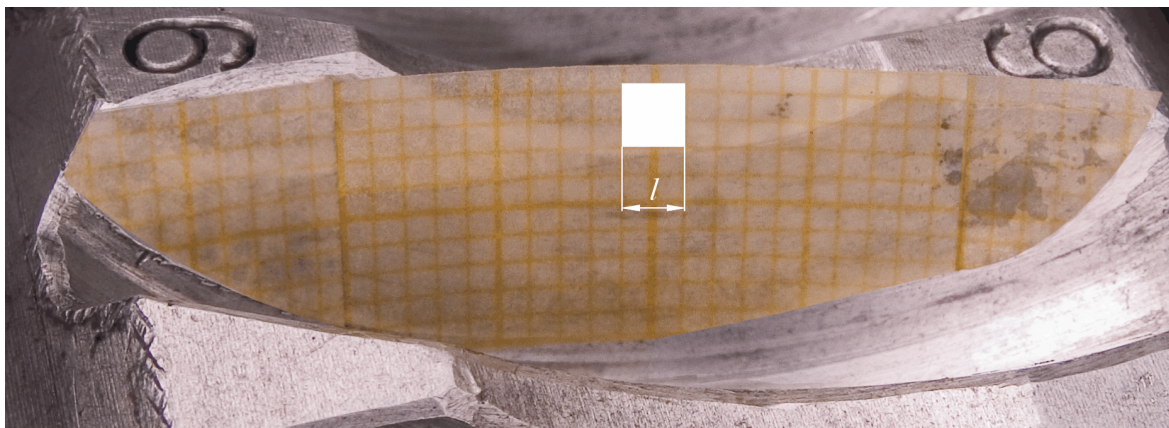
Položaj fotoaparata u odnosu na bok zuba pužnog kola opisan u odjeljku br. 8.3 odabran je na način da bude vidljiva cijela površina boka. Od aksijalne ravnine os objektiva je otklonjena približno za srednji kut uspona γ_m .

Kako bi bilo moguće odrediti površinu na fotografiji potrebno je utvrditi pripadno mjerilo. U kontekstu digitalne fotografije mjerilo zavisi od dva čimbenika:

- a) rezoluciji fotografije i
- b) mjerilu fotografiranog predmeta.

Za snimanje fotografija odabrana je rezolucija od 300 dpi, odnosno približno 11,811 piksela/mm¹⁶. Kako bi se odredilo mjerilo predmeta načinjen je niz fotografija s uzorkom milimetarskog papira prikladno pričvršćenim uz površinu boka zuba pužnog kola. Debljina crtovlja milimetarskog uzorka iznosi 0,25 mm. Na fotografiji je ucrtan referentni kvadrat na dijelu uzorka smještenom simetrično obzirom na normalnu ravninu gdje je pretpostavljen najmanji utjecaj distorzije i zakrivljenosti površine boka zuba. Duljina referentne crte l (baza kvadrata, slika 7.7) izmjerena je pomoću komercijalnog grafičkog programa te iznosi približno 8,47 mm (100 piksela). Na temelju navedenih vrijednosti određeno je mjerilo fotografije za odabrane uvjete te iznosi približno 4,23:1. Jedinичna površina od 1 mm² na boku zuba pužnog kola odgovara približno površini od 17,92 mm² na fotografiji. Procijenjena greška ucrtavanja referente duljine obzirom na rezoluciju digitalne fotografije iznosi 4 piksela odnosno približno 0,339 mm u mjerilu fotografije. Preračunato na površinu projekcije boka zuba (tablica 7.3) greška može iznositi do 0,2%.

¹⁶ Broj znamenki iza decimalnog zareza ne implicira povećanu točnost već je rezultat pretvorbe mjernih jedinica;



Slika 7.7 Određivanje mjerila predmeta na temelju referentne geometrije

Postupak je proveden uz uvjete predviđene za praćenje površine oštećenja boka zuba pužnog kola pa će se dobiveno mjerilo koristiti za njeno određivanje.

U prethodnom je odjeljku prikazana mogućnost određivanja približne površine boka zuba na temelju projekcije u čeonj ravnini. Zbog položaja fotoaparata (os objektiva je otklonjena od horizontalne i aksijalne ravnine za različite kutove) ravnomjernost prikrate obzirom na projekciju u čeonj ravnini se gubi, odnosno faktor prikrate je veći u dnu zuba te na izlaznoj strani. Srednji iznos prikrate može se odrediti direktno pomoću omjera stvarne i projicirane površine, a točnija se vrijednost može postići podjelom površine boka zuba na lijevu i desnu stranu obzirom na normalnu ravninu. Površine projekcije se određuju iz fotografije uporabom komercijalnog grafičkog programa uz uporabu funkcija potrebnih za obradu digitalnih zapisa (tablica 7.3).

Tablica 7.3 Površine projekcije boka zuba i faktori prikrate (površine u mm²)

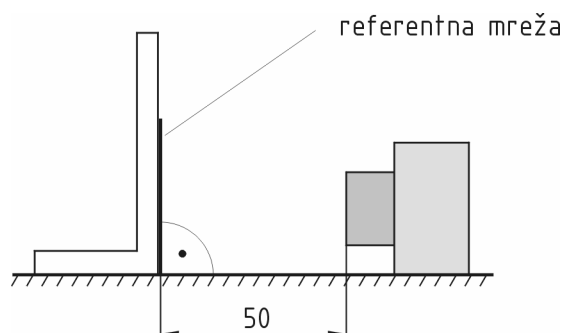
Površina	projekcije	3D modela	Faktor prikrate
cijelog boka	208,9	258,6	1,227
lijevo od normalne ravnine	104,2	123,83	1,188
desno od normalne ravnine	104,7	132,47	1,265

Budući da se rupičenje kod pužnih kola većinom pojavljuje na izlaznoj strani boka potrebno je utvrditi kolika bi bila razlika između površina izračunatih pomoću faktora prikrate cijelog boka odnosno samo desne strane (u provedenom ispitivanju izlazna strana zahvata nalazi se desno od normalne ravnine). Uz pretpostavljenu površinu projekcije oštećenja rupičenjem od 20 mm² razlika bi iznosila približno 0,8 mm², odnosno 4%.

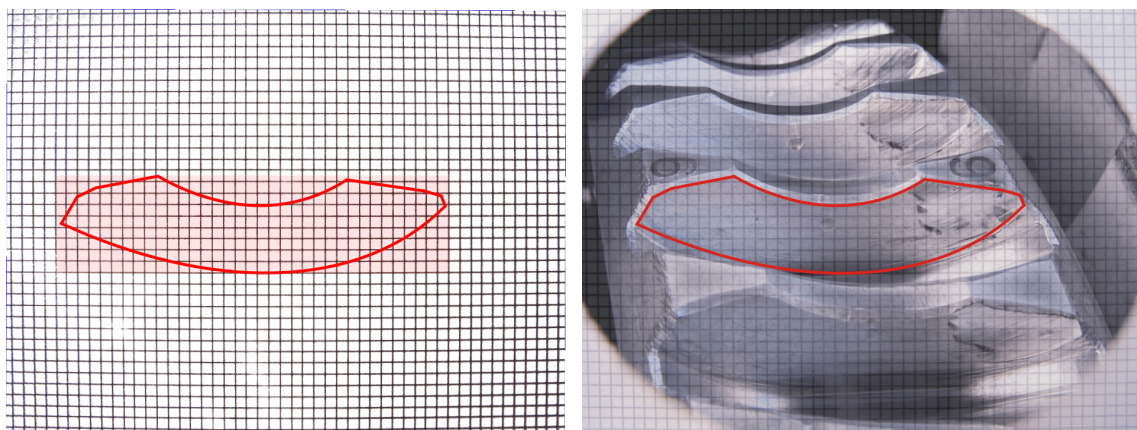
Za slučaj da se oštećenje nalazi desno od normalne ravnine, na izlaznoj strani boka, cijela se površina uvećava za faktor prikrate desne strane. Ako oštećenje prelazi znatno i na lijevu stranu, svaka se površina treba uvećati pripadnim faktorom prikrate.

7.3 Distorzija

Budući da se pojedini promatrani dijelovi ne nalaze na jednakoj udaljenosti od objektiva foto aparata njihov prikaz na fotografiji neće biti ujednačen. Deformacija slike, kao posljedica malenih razlika u povećanju različitih dijelova slike, naziva se distorzija [47]. Distorzija zavisi o lećama objektiva fotoaparata, udaljenosti i kutu otklona od osi objektiva. U cilju određivanja distorzije objektiva korištenog u ispitivanju provedeno je fotografiranje referentne mreže crta uzorka 1 mm po vertikali i horizontali. Uvjeti fotografiranja određeni su udaljenošću objektiva od površine boka zuba pužnog kola promatranog prijenosnika kako je prikazano na slici 7.8.



Slika 7.8 Utvrđivanje distorzije na referentnoj mreži



Slika 7.9 Distorzija mreže i utjecaj na slikanje zuba pužnog kola

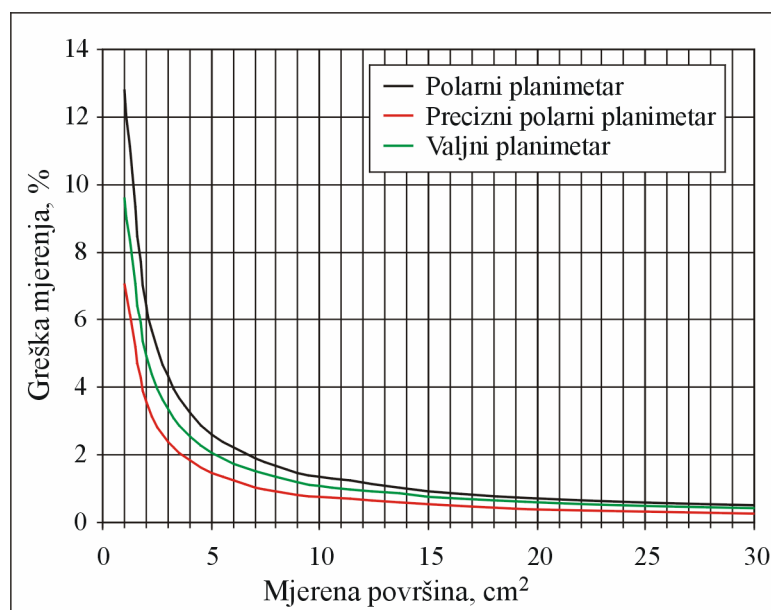
Distorzija raste s povećanjem kuta otklona od osi objektiva, pa je na granicama mreže, posebno u kutovima, izraženija. Analizom fotografije utvrđeno je ukupno povećanje površine označenog pravokutnika (slika 7.9 lijevo – pravokutnik opisan konturi površine boka zuba) za približno 0,9%. Obzirom da distorzija u sredini fotografije ima najmanji utjecaj te da je duljina predmetne površine veća od visine jasno je da veći udio u povećanju imaju lijeva i desna strana površine, odnosno ulazni i izlazni dio boka zuba pužnog kola. Uzimanjem u obzir samo konturom obuhvaćene površine boka te uz pretpostavku da se

povećanje s dovoljnom točnošću može podijeliti na 1/2 ukupne površine (ulazni i izlazni dio) dobije se povećanje površine projekcije od približno 1 mm^2 .

Navedena analiza pokazuje utjecaj pojedinih čimbenika u određivanju stvarne i projicirane površine boka zuba pužnog kola. Najveći utjecaj u određivanju stvarne površine boka ima primijenjeni proračunski model, dok u određivanju površine oštećene rupičenjem najveći utjecaj ima faktor prikrate. Navedeni će utjecaji biti uzeti u obzir u određivanju udjela površine boka oštećene rupičenjem, dok će utjecaj distorzije biti zanemaren.

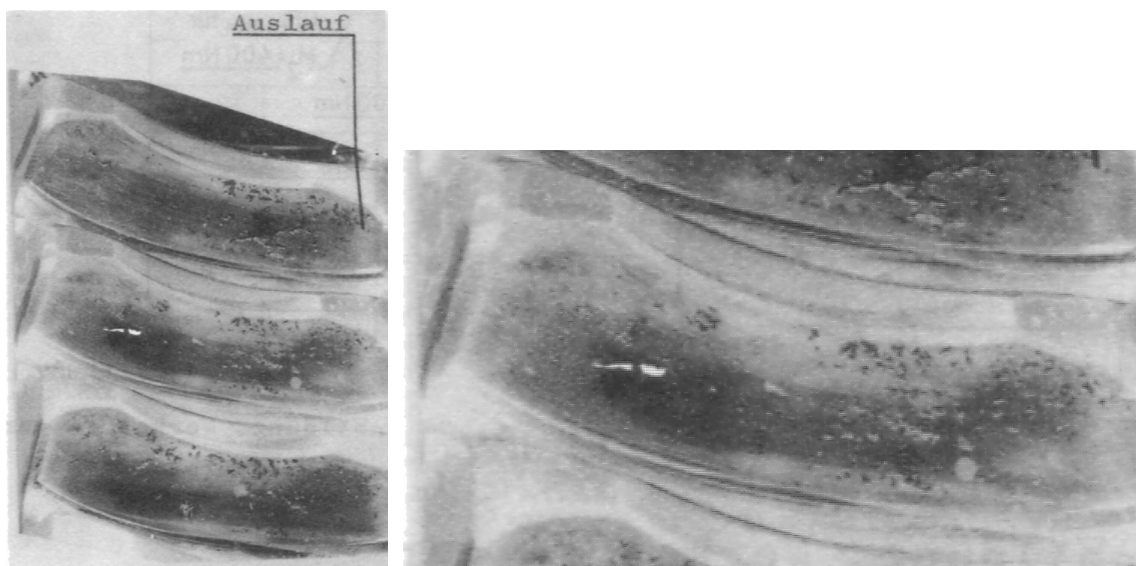
7.4 Određivanje površine oštećenja

Površine oštećenja pužnih kola rupičenjem u istraživanjima [1, 2, 4] određivane su uporabom planimetra. Prema [49] točnost određivanja površine planimetrom zavisi o preciznosti i stanju mjernog instrumenta, vještini mjeritelja i ispravnom provođenju postupka, broju ponavljanja te veličini površine koja je predmet mjerenja. Možebitne netočnosti (uz pretpostavku ispravno provedenog postupka) mogu se umanjiti ponavljanjem mjerenja te određivanjem srednje vrijednosti. Glede veličine površine koja se mjeri, greška je to veća što je površina manja, a prema [49] iznosi približno 2.6% za površinu od 50 mm^2 za jedno mjerenje polarnim planimetrom. Zavisnost greške o veličini površine za tri različite vrste planimetara prikazana je dijagramom na slici 7.10.



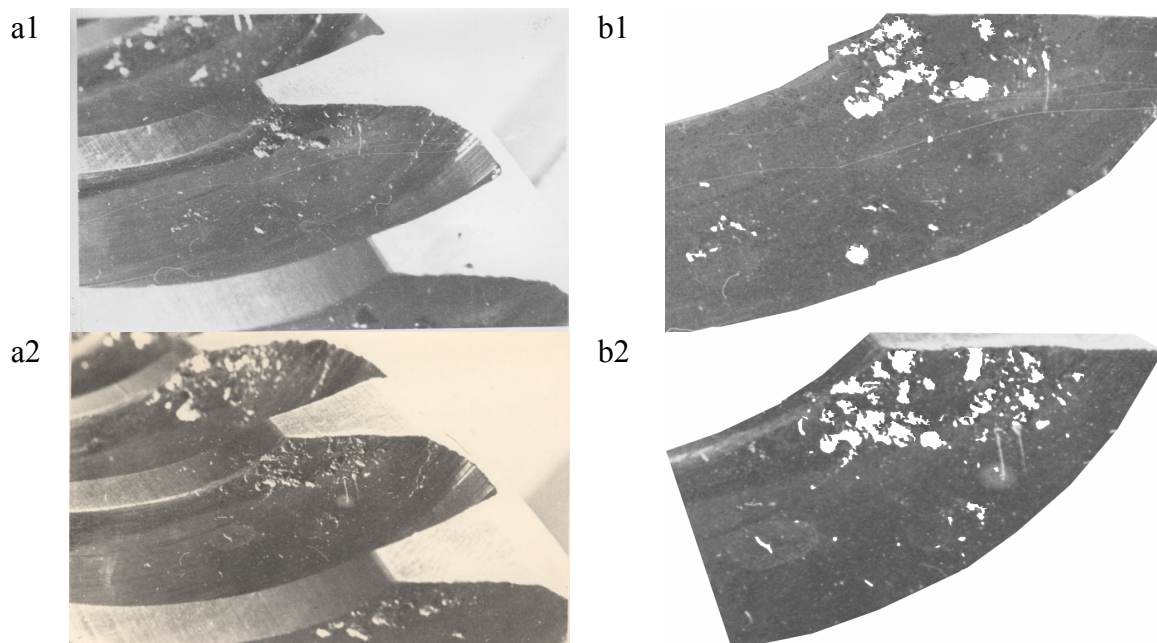
Slika 7.10 Greška mjerenja planimetrom u zavisnosti o veličini mjerene površine

Obzirom na razvoj oštećenja rupičenjem greške mjerenja će biti veće kod malih udjela oštećenja, odnosno kada su oštećenja rasprostranjena po površini zuba. Slika 7.11 [2] prikazuje oštećenja rupičenjem bokova pužnog kola načinjenog od materijala CuSn12Ni nakon 1500 sati rada pod opterećenjem od 500 Nm. Na slici su vidljive male površine oštećenja raspoređene pretežito na izlaznoj strani boka.



**Slika 7.11 Oštećenje rupičenjem bokova pužnog kola CuSn12Ni
nakon 1500 h pri opterećenju od 500 Nm**

Na temelju dostupnih materijala i rezultata iz [4] provedena je analiza fotografija metodom kako je opisano u odjeljku 9.4 te određena površina oštećenja rupičenjem (slika 7.12). Usporedbom vrijednosti nađena su odstupanja od 3% do 25% (sve su vrijednosti određene planimetrom bile manje od dobivenih analizom digitaliziranih fotografija). Ovdje treba imati na umu da su površine oštećenja male i mnogobrojne, dakle upravo u području gdje su greške planimetriranja izraženije.



**Slika 7.12 Oštećenja rupičenjem bokova pužnog kola AlSn6
nakon 350 h pri opterećenju od 150 Nm.**

**Lijevo, planimetriranjem : a1) 1,85% PP, a2) 3,15% PP
Desno, digitalnom obradom: b1) 1,65% PP, 2,36% PP**

Ne treba zanemariti i činjenicu da velik broj malih površina zasigurno utječe i na objektivnost mjeritelja te može utjecati na valjanost rezultata. Kako bi se postiglo dobro

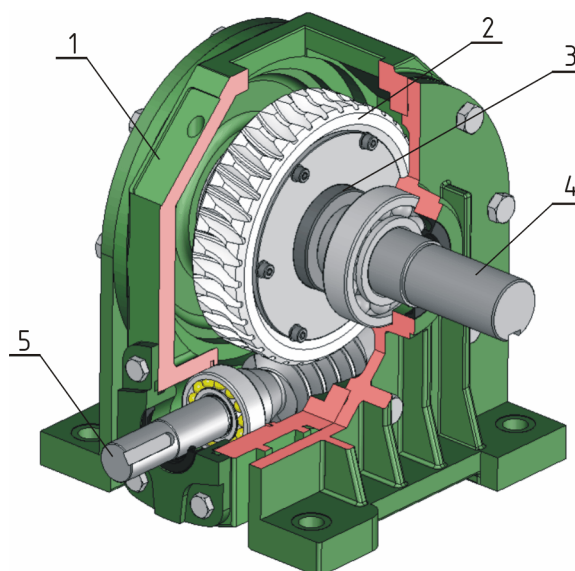
praćenje dinamike i razvoja oštećenja potrebno je sukcesivno pratiti rad prijenosnika te ponavljati proces planimetriranja. Pored upitne točnosti mjerenje je stoga i vremenski zahtjevno.

Može se zaključiti da određivanje površina oštećenja planimetriranjem, poglavito površina manjih od 10 mm^2 , može za posljedicu imati greške mjerenja veće od 6% po svakoj pojedinoj površini. Analiza veze između točnosti određivanja površina oštećenja i zakonitosti procesa trošenja rupičenjem sadržana je u hipotezi ovoga rada.

Ispitivanje je provedeno u prostorijama Laboratorija za elemente strojeva Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Tijekom ispitivanja korištena je odgovarajuća oprema po potrebi prilagođena zahtjevima postupka.

8.1 Ispitni prijenosnik

Kućište pužnog prijenosnika korištenog za ispitivanje (slika 8.1) serijski je proizvod s dodatnim preinakama potrebnim za praćenje zahvata zupčanika te ugradnju možebitne mjerne opreme. Ležajevi obaju vratila su kotrljajući, a zupčanički par se podmazuje uranjanjem. Tanjurasta opruga predviđena za osiguravanje aksijalnog položaja vratila pužnog kola zamijenjena je odgovarajućim podložnim pločicama (vidi odjeljak uhodavanje).



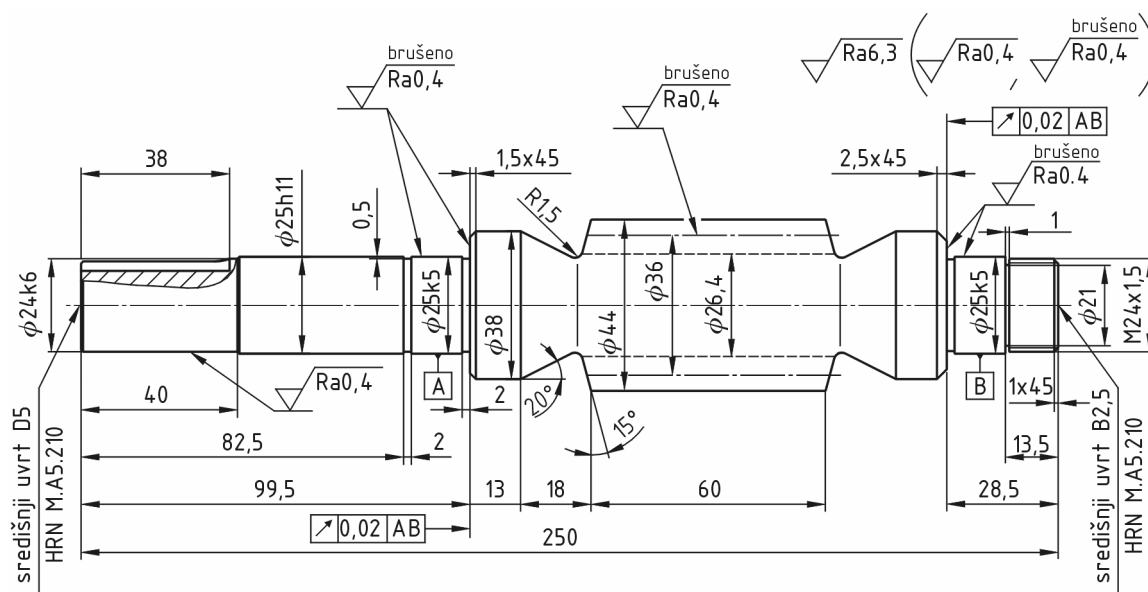
Slika 8.1 Računalni model pužnog prijenosnika korištenog u ispitivanju
1-kućište, 2-pužno kolo, 3-glavina pužnog kola, 4-vratilo pužnog kola, 5-pužni vijak

Ispitivanje je provedeno s dva para zupčanika gdje su dimenzije i materijal pužnog vijka jednaki u oba slučaja, pužna su kola načinjena od različitih materijala, a različita je jedino širina. Kombinacije parova naznačene su u tablici 8.1. Svojstva materijala puža i pužnih kola detaljno su opisana u poglavlju br. 4.

Tablica 8.1 Kombinacije pužnih parova korištenih u ispitivanju

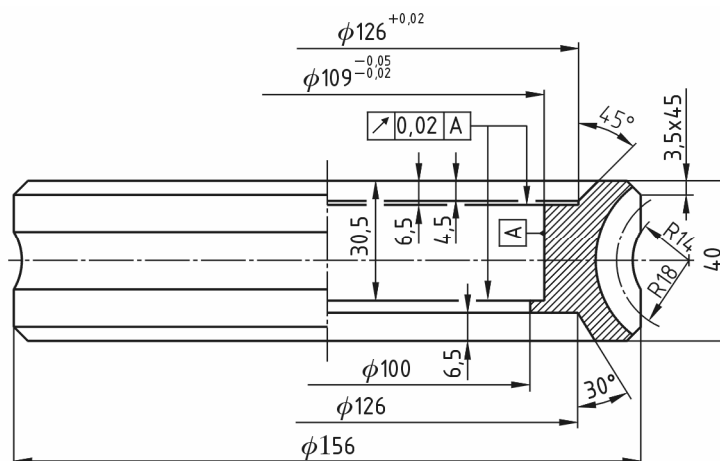
	Puž	Pužno kolo	
	Materijal	Materijal	Širina b_{2R} , mm
Par 1	Č 4320	AlSn6	40
Par 2	(DIN 16MnCr5)	CuSn12	32

Pužni vijak je izveden iz jednog dijela s vratilom. Pužna kola su naprešana na odgovarajuće glavine te spojena i osigurana vijcima. Na svakom pužnom kolu brojevima od 1 do 6 su označeni zubi čiji je jedan od bokova predviđen za kontinuirano praćenje. Aksijalna i radijalna točnost vrtnje pužnih kola kontrolira se nakon ugradnje u kućište prijenosnika. Radionički crteži pužnih kola te pužnog vijka prikazani su slikama 8.2 i 8.3.

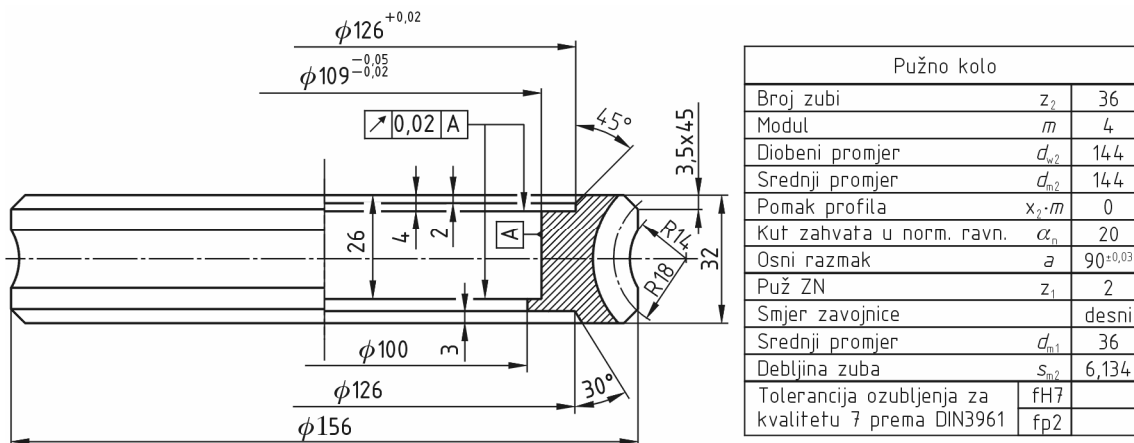


Pužni vijak		
Broj zubi	z_1	2
Smjer zavojnice		desn.
Modul	m	4
Srednji promjer	d_{m1}	36
Kut zahvata u norm. ravn.	α_n	20
Aksijalni korak	p_z	12,566
Uspon	P	25,132
Srednji kut uspona	γ_m	12,529
Debljina zuba	s_{m1}	6,134
Tjemena visina zuba	h_a	4
Osni razmak	a	$90 \pm 0,03$
Profil		ZN
Broj zubi kola	z_2	36
Diobeni promjer	d_{w2}	144
Tolerancija ozubljenja za kvalitetu 7 prema DIN3961	fH7	
	fH9	

Pužno kolo		
Broj zubi	z_2	36
Modul	m	4
Diobeni promjer	d_{a2}	144
Srednji promjer	d_{m2}	144
Pomak profila	$x_2 \cdot m$	0
Kuť zahvata u norm. ravni.	α_n	20
Osni razmak	a	$90 \pm 0,03$
Puž ZN	z_1	2
Smjer zavojnice		desni
Srednji promjer	d_{m1}	36
Debljina zuba	s_{m2}	6,134
Tolerancija ozubljenja za kvalitetu 7 prema DIN3961	fH7	
	fH7	



Slika 8.2 Radionički crteži pužnog vijka i pužnog kola načinjenog od AlSn6 legure



Slika 8.3 Radionički crtež pužnog kola načinjenog od CuSn12 legure

8.2 Ispitno postolje

U istraživanju je korišteno postojeće ispitno postolje razvijeno u Laboratoriju za elemente strojeva Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u sklopu istraživanja [4]. Postolje (slika 8.4) se može podijeliti na tri osnovne cjeline:

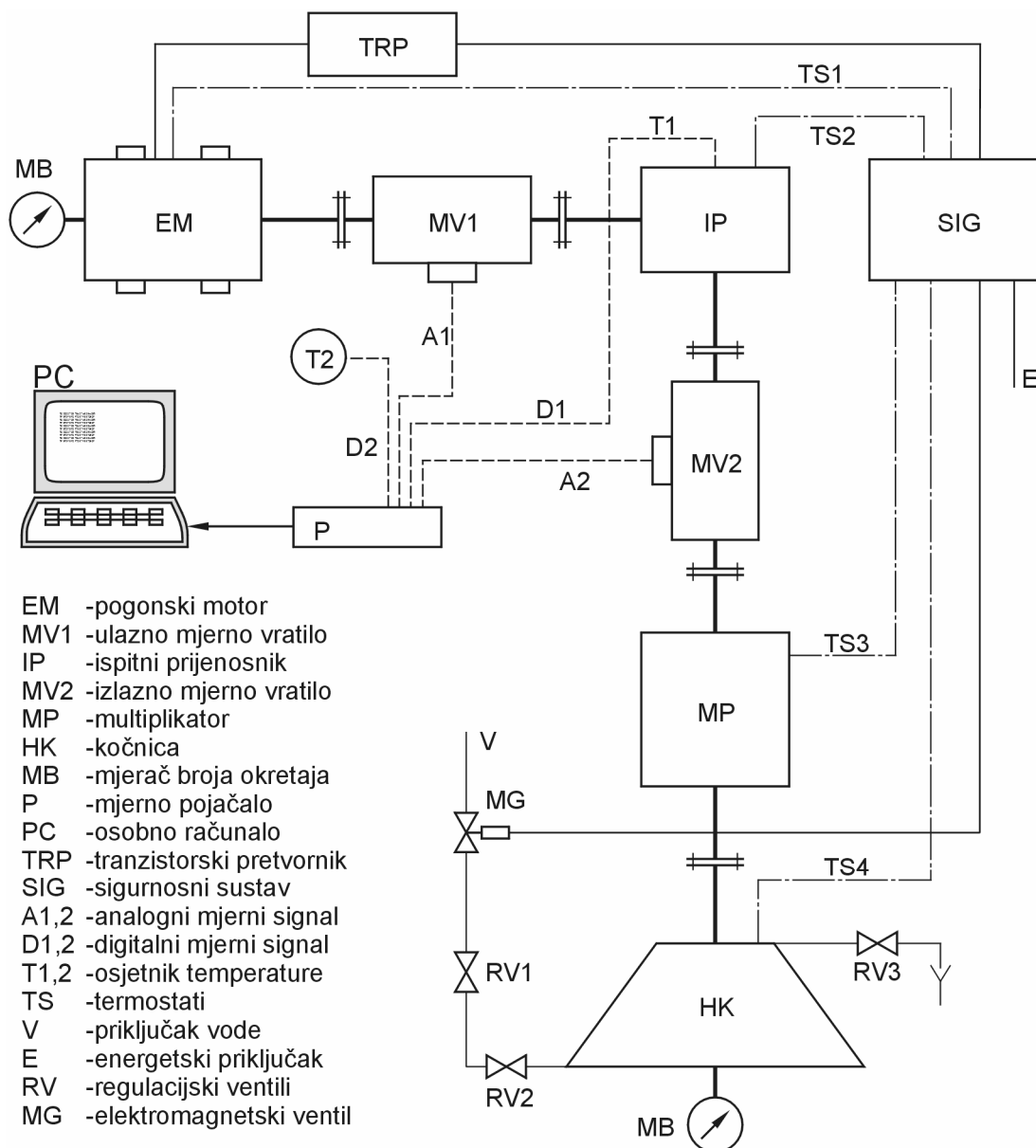
- elektromehanički dio,
- mjerni dio i
- sigurnosni dio.

Rad postolja se temelji na principu hidrauličkog kočenja. Brzina vrtnje pogonskog motora (EM) regulirana je tranzistorskim pretvaračem (TRP). Motor je tenzometarskim mjernim vratilom (MV1) spojen s ulaznim vratilom ispitnog prijenosnika (IP) čije je izlazno vratilo preko drugog mjernog vrtila (MV2) spojeno s multiplikatorom (MP). Izlazno vratilo multiplikatora je spojeno na hidrauličku kočnicu (HK). Multiplikator povećava brzinu vrtnje izlaznog vrtila ispitnog prijenosnika jer o njoj direktno zavisi moment kočenja

hidrauličke kočnice. Opterećenje se određuje protokom vode kroz hidrauličku kočnicu podešavanjem regulacijskih ventila (RV2 i RV3) te stupnjem prijenosa multiplikatora.

Mjerni dio sustava čine elementi za praćenje i prikupljanje pojedinih veličina, poglavito momenta uvijanja ispred (MV1) i iza (MV2) ispitnog prijenosnika. Pored navedenih veličina prati se i temperatura ulja unutar prijenosnika (T1) te temperatura prostorije (T2). Temperatura ulja se mjeri pomoću termo-pare smještenog neposredno ispod pužnog vijka, unutar kućišta prijenosnika. Navedene se veličine mjernim pojačalom (P) i odgovarajućim programskim paketom kontinuirano ili povremeno pohranjuju na čvrsti disk osobnog računala (PC).

Zaštita opreme od pregrijavanja provedena je pomoću releja upravljanog zasebnim krugom istosmjerne struje napona 24 V. Pogonski motor, ispitni prijenosnik, multiplikator i kočnica opremljeni su serijski spojenim kapilarnim termostatima (TS) s mogućnošću podešavanja radnog područja, a u isti krug je spojen i elektromagnetski ventil (MG) ugrađen na priključku vode. U slučaju porasta temperature preko dopuštene granice bilo kojeg od navedenih dijelova opreme relej prekida napajanje tranzistorskog pretvarača električnom energijom (u slučaju direktnog pogona napajanje motora) te zaustavlja pogon dok elektromagnetski ventil prekida dobavu vode. Osobno računalo i mjerno pojačalo napajaju se iz zasebnog izvora te je, tijekom kontinuiranog praćenja, moguće utvrditi može bitno vrijeme prekida rada.



Slika 8.4 Sustav ispitnog postolja

Detaljni podaci o opremi korištenoj u ispitivanju nalaze se u prilogu na kraju rada.

8.3 Oprema za fotografiranje

Potrebna je oprema odabrana ili konstruirana i izrađena na temelju pretpostavljenih uvjeta fotografiranja, postavljenog zadatka te željenih rezultata. Zahtjevi na postupak i uvjeti fotografiranja svode se na sljedeće:

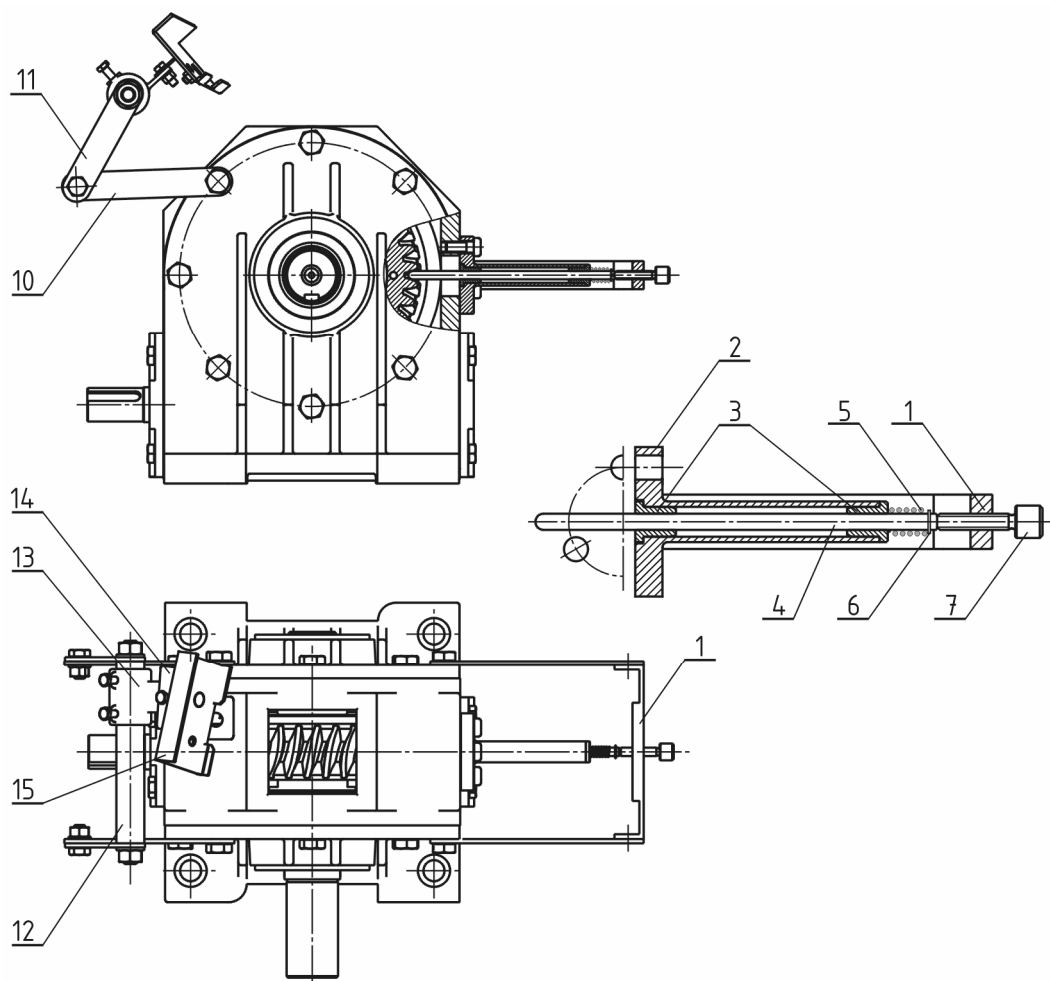
- Prijenosnik neće biti rastavljan za vrijeme trajanja jednog ciklusa ispitivanja. Na ovaj se način dokidaju možebitne greške tijekom demontaže i montaže ali je odabrane bokove zubi pužnog kola potrebno fotografirati unutar prijenosnika.
- Položaj fotografskog aparata mora biti takav da bude vidljivo cijelo polje zahvata uz najmanju moguću prikratu.

- Obzirom na radne uvjete (neposredna blizina ulja, vibracije, temperatura) koji mogu oštetiti fotografski aparat te potrebe nadzora nad pogonom odlučeno je da isti ne bude postavljen stacionarno. Stoga je potrebno je osigurati ponovljivost položaja fotografiranja obzirom na montažu i demontažu aparata.
- Potrebno je osigurati ponovljivost položaja fotografiranja obzirom na svaki odabrani zub ponaosob.
- Površine bokova zubi pužnog kola sjajne su metalne površine male hrapavosti zbog uglačavanja uslijed kliznog gibanja u kojima će se reflektirati okolina, a naročito izvori svjetla.
- Površine oštećene rupičenjem razlikuju se u teksturi i intenzitetu refleksije od ostatka površine boka zuba.
- U unutrašnjosti prijenosnika su uvjeti za kvalitetno osvjetljenje nepovoljni.
- Potrebno je smanjiti ili dokinuti utjecaj vanjskog osvjetljenja.

U skladu s navedenim zahtjevima i uvjetima te mogućnostima izvedbe rješenje se sastoji od četiri stavke:

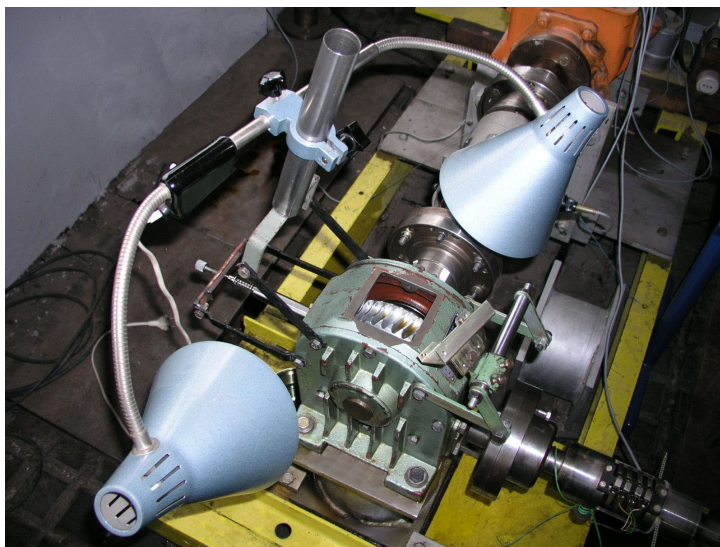
1. Nosača fotografskog aparata za ugradnju direktno na ispitni prijenosnik s mogućnosti podešavanja otklona od horizontalne i vertikalne ravnine te udaljenosti od promatranog boka (slika 8.5, glavne pozicije 10 do 15). Uvažavajući potrebu za višestrukim montažama i demontažama, uvjete rada te udaljenost od pužnog kola nosač je izveden iznimno krut i robustan.
2. Naprave za pozicioniranje pužnog kola, također za ugradnju direktno na ispitni prijenosnik (slika 8.5, glavne pozicije 1 do 6). Klizač (pozicija 4) s kuglastim vrhom, dobro ležišten u vodilicama (pozicija 3) ulazi u odgovarajuću uzubinu pužnog kola te neposredno osigurava položaj boka koji se fotografira na gornjoj strani prijenosnika.
3. Osvjetljenja i sjenila. Kako bi se umanjila mogućnost refleksije na bokovima zuba potrebno je unutar prijenosnika ostvariti indirektno prigušeno osvjetljenje. Isto tako, potrebno je onemogućiti ili umanjiti refleksiju tamnih površina unutrašnjosti prijenosnika (tijekom obrade digitalne fotografije odraz tamne površine na boku zuba može biti uzeta kao površina oštećena rupičenjem te pogrešno obračunata). Položaj dvaju rasvjetnih tijela osiguran je nosačem ugrađenim direktno na kućište prijenosnika. Utjecaj refleksije unutar prijenosnika umanjuje se umetanjem papirnate pregrade obojene u tonu materijala pužnog kola, utjecaj refleksije fotografskog aparata pregradom na prednjoj strani, a prigušeno osvjetljenje se postiže umetanjem sjenila na otvor prijenosnika.

4. Određivanja položaja i udaljenosti fotografskog aparata od promatranog boka te položaja rasvjetnih tijela. Za referentnu točku odabrano je probodište diobene srednje kružnice pužnog kola s površinom boka zuba. Vertikalna ravnina objektiva otklonjena je od aksijalne ravnine pužnog kola za srednji kut uspona γ_m te se poklapa s normalnom, a od tangencijalne ravnine za kut koji je veći od kuta zahvatne crte u normalnom presjeku. Naime, poklapanjem osi objektiva s zahvatnom crtom u normalnom presjeku bok prethodnog zaklonio bi dio boka promatranog zuba pa ne bi bilo moguće pratiti promjene na cijeloj površini. Stoga je navedeni kut otklona odabran prema kriteriju optičke vidljivosti kao najmanji kut kod kojeg je još uvijek vidljiva cijela promatrana površina boka zuba pužnog kola. Udaljenost leće objektiva od promatranog boka određena je mogućnostima fotografskog aparata, a u ispitivanju iznosi približno 50 mm. Položaj rasvjetnih tijela određen je u skladu s rasporedom ostale opreme probnim fotografiranjem do postizanja zadovoljavajućeg rezultata.

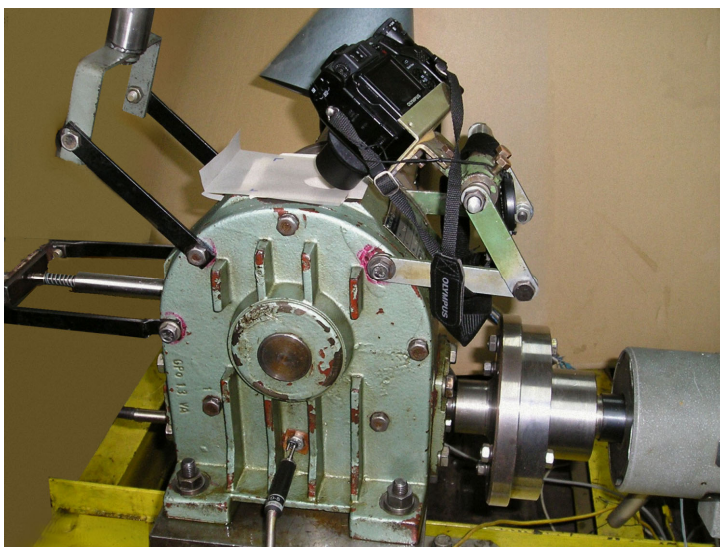


Slika 8.5 Nosač fotografskog aparata i sustav pozicioniranja zuba pužnog kola

Ispitni prijenosnik s ugrađenim pužnim kolom načinjenim od AlSn6 legure, ugrađen na ispitno postolje i spojen mjernim vratilima te sa postavljenom prije pobrojanom opremom za provedbu fotografiranja prikazan je na slikama 8.6 i 8.7.



Slika 8.6 Ispitni prijenosnik s opremom



Slika 8.7 Ispitni prijenosnik za vrijeme fotografiranja

Provedba pokusa

Prema cilju istraživanja provode se pokusi određivanja površine boka zuba pužnog kola oštećene rupičenjem i to s dva različita materijala pužnih kola (vidi prethodno poglavlje). Usporedno se provodi i praćenje stupnja korisnog djelovanja prijenosnika. Pokusi se provode na ispitnom postolju i uz upotrebu opreme opisane u prethodnom poglavlju.

Pojava oštećenja rupičenjem određena je dinamičkom izdržljivošću materijala te uvjetima pogona. Budući da cilj rada nije istraživanje u uvjetima kada je veličina površine oštećenja granična (40 do 60% oštećene površine, što implicira dugotrajan pogon), odluka o prekidu ili nastavku pogona donosi se uvijek nakon analize posljednje grupe fotografija. Ispitivanje se provodi kontinuiranim opterećenjem za svaki ispitni par ponaosob, a brzina vrtnje je konstantna.

Postupak

1. montaža dijela sklopa pužnog kola (pužno kolo, glavina, vratilo) te kontrola točnosti vrtnje u aksijalnom i radijalnom smjeru
2. montaža sklopa pužnog kola te pred-montaža ispitnog prijenosnika.
3. kontrola točnosti vrtnje ugrađenog pužnog kola
4. podešavanje početnog zahvata podložnim pločicama te kontrola indigo pastom bez opterećenja i u probnom pogonu
5. montaža prateće opreme (nosač fotografskog aparata, sustav pozicioniranja i nosač rasvjetnih tijela) nakon postizanja zadovoljavajuće slike nošenja
6. umjeravanje mjernih vrtila na ulazu i izlazu iz ispitnog prijenosnika posredno pomoću utega poznate mase
7. uhodavanje
8. pogon s nazivnim opterećenjem
9. fotografiranje 6 odabranih zuba (točke 8 i 9 se ponavljaju sve dok se ne donese odluka o prestanku ispitivanja)
10. digitalna obrada

9.1 Podešavanja slike nošenja

Dodir između bokova podešava se da započinje na izlaznoj strani bokova zubi pužnog kola. Na ovaj način se pospješuje formiranje uljnog klina između bokova te stvaranje nosivog mazivog sloja, a slika nošenja se širi od izlazne prema ulaznoj strani (protusmjerno). Zbog manje dužine dodirnih linija specifično je opterećenje veće pa je i trošenje u početnom periodu izraženije. Obzirom na smjer zavojnice puža aksijalna sila na pužnom kolu djeluje u smjeru izlazne strane vratila pa se podložne pločice debljine 0,1 mm umeću između ležaja i kućišta na izlaznoj strani. Ocjena slike nošenja se provodi nanošenjem indigo paste na puž posredno preko pužnog kola (puž se nalazi ispod kola i nije dostupan), a preko puža i na preostale zube (slika 9.1). Kontrolira se početni zahvat bez opterećenja te u probnom pogonu uz 40% nazivnog opterećenja. Postupak podešavanja se ponavlja dok se ne postigne najmanje 50% slike nošenja na izlaznoj strani boka zuba.



Slika 9.1 Kontrola slike nošenja indigo pastom; prvo podešavanje bez opterećenja
AlSn6 kola (lijevo) i CuSn12 kola (desno)

9.2 Uhodavanje

U kontekstu pužnih prijenosnika uhodavanje je postupak postizanja pune slike nošenja na bokovima zuba pužnog kola. Cilj uhodavanja je uglašavanje i povećanje nalijeganja između površina u dodiru. Smanjenje hrapavosti rezultira manjim faktorom trenja, a s povećanjem nalijeganja rastu dužine dodirnih linija pa se opterećenje ravnomjernije raspodjeljuje po površini bokova. Kako bi broj ciklusa opterećenja s djelomičnom slikom nošenja bio što manji uhodavanje je potrebno provesti u što je moguće kraćem vremenu da ne bi došlo do ranog umora materijala. Rad s punom slikom nošenja jedan je od zahtijeva kod ispitivanja pužnih prijenosnika [6].

Uhodavanje se u ovom ispitivanju provodi s istom vrstom ulja koje se koristi i u pogonu (kod posebnih i odgovornih prijenosnika ili na zahtjev naručitelja može se uhodavanje provesti i s posebnim sredstvima). Budući da normom postupak uhodavanja nije obuhvaćen te se isti provodi na temelju iskustva za različite uvjete i kombinacije materijala usvojiti će se parametri korišteni u [4] gdje je postupak podijeljen u tri stupnja:

1. uz nazivnu brzinu vrtnje i opterećenje $T_2 = 0,4 \cdot T_{2N}$ u trajanju od 1 h,
2. uz nazivnu brzinu vrtnje i opterećenje $T_2 = 0,7 \cdot T_{2N}$ u trajanju od 1 h,
3. uz nazivnu brzinu vrtnje i opterećenje $T_2 = T_{2N}$ u trajanju od 1 h.

Svakom sljedećem stupnju prethodi kontrola napredovanja trošenja. Ako rezultat, na temelju procjene, nije zadovoljavajući može se postupak ponoviti novim podešavanjem početnog zahvata. U slučaju da se nakon trećeg stupnja ne postigne puna slika nošenja pogon se nastavlja s nazivnim opterećenjem do postizanja pune slike nošenja.

Nazivni moment na izlaznom vratilu je određen na način da se temperatura ulja u prijenosniku ustali na približno 60°C nakon postizanja toplinske ravnoteže s okolinom temperature 22°C. Zavisno od promjene temperature okoline predviđena je najveća temperatura ulja od 70°. Probnim pogonom s već rabljenim pužnim kolom AlSn6 utvrđena je okvirna vrijednost nazivnog momenata od 70 Nm kod kojeg se temperatura ulja ustaljuje na predviđenoj vrijednosti. Isto se opterećenje koristi za uhodavanje oba pužna kola, a obzirom na razliku u karakteristikama materijala, uhodavanje kola načinjenog od CuSn12 će teći nešto sporije. Naknadno će, u tom slučaju, vrijednost momenta na izlaznom vratilu biti izmijenjena kako bi temperatura ulja u stanju toplinske ravnoteže bila jednaka predviđenoj.

9.3 Fotografiranje

Fotografiranje zuba pužnih kola za oba ispitivana slučaja se provodi c. Obzirom na malu intermitenciju pretpostavlja se da je utjecaj ponovnog puštanja u rad zanemariv.

Postupak fotografiranja je kako slijedi:

1. zaustavljanje pogona i hlađenje; isključivanje mjerne opreme
2. vizualna kontrola pužnog kola
3. čišćenje površine bokova na tri odabrana zuba pužnog kola
4. postavljanje sjenila
5. ugradnja fotografskog aparata na nosač i uključivanje rasvjetnih tijela
6. podešavanje položaja promatranog boka, osiguranje položaja i fotografiranje (ponavlja se za svaki od tri očišćena zuba)
7. čišćenje preostala tri odabrana zuba
8. podešavanje položaja promatranog boka, osiguranje položaja i fotografiranje (ponavlja se za svaki od preostala zuba)
9. isključivanje rasvjetnih tijela, demontaža fotografskog aparata i uklanjanje sjenila
10. vizualna kontrola prijenosnika i opreme

11. pregled digitalnih fotografija te obrada jedne odabranog zuba kako bi se utvrdio trend napredovanja i površina možebitnog oštećenja (ako postoji u toj fazi ispitivanja)
12. kontrola podataka prikupljenih mjernom opremom u cilju utvrđivanja nepravilnosti tijekom prethodnog pogona
13. uključivanje mjerne opreme i puštanje u pogon ako je donesena odluka o nastavku rada.

Fotografije se pohranjuju prema nomenklaturi koja uključuje datum, broj zuba i kombinaciju sjenila. Navedena nomenklatura omogućuje brzo preslagivanje po nekom od uvjeta, odnosno grupiranje fotografija istog boka prema kronološkom redoslijedu što je važno u pripremi za obradu. Uz fotografije se pohranjuje i podatak o broju ciklusa do trenutka fotografiranja te podaci prikupljeni mjernom opremom.

9.4 Digitalna obrada

Obzirom na odabrani oblik zapisa (*RAW* format, odjeljak 6.2) te područja koje je predmet praćenja obrada fotografija se može podijeliti u dvije faze:

1. predobradu i
2. obradu i analizu

9.4.1 Predobrada

Izvorne su fotografije pohranjene u *RAW* obliku zapisa približnih dimenzija 216,75*162,56 mm. Za daljnju obradu fotografije treba prevesti u prikladan format i dimenzije uz istovremeno provođenje možebitnih korekcija osvjetljenja i kontrasta imajući u vidu sljedeći korak u obradi. Prethodnim provođenjem svih faza predobrade, obrade i analize na probnim fotografijama utvrđeni su optimalni parametri pretvorbe te je načinjena odgovarajuća programska rutina. Grupi fotografija se slijedno prilagođavaju navedena svojstva, reducira visina (površina boka se nalazi u središnjem dijelu pa nema razloga za zadržavanjem cijele fotografije) te ih se pohranjuje u odabranom formatu, u ovom slučaju *TIFF* obliku zapisa bez sažimanja. Dodatnom se poluautomatskom procedurom usklađuje položaj referentnih točaka fotografija bokova zuba prema prvoj načinjenoj fotografiji za svaki bok ponaosob.

9.4.2 Obrada i analiza

Fotografije svedene na prikladnu dimenziju i pohranjene u odgovarajućem formatu pripremljene su za posljednju fazu obrade. Kao i u prethodnoj fazi sve radnje provode se na izvornoj fotografiji, a rezultati pohranjuju u novu datoteku. Na ovaj način ostaje sačuvana izvorna fotografija iz svake faze obrade.

Obrada se sastoji iz niza pojedinačnih postupaka gdje je fotografija, rezultat prethodnog, ujedno i predmet obrade idućeg. Ovakav niz, jednak po postupcima, a parametara

podešenih za svaki pojedini bok, primjenjuje se na grupu fotografija jednoga boka što je omogućeno detaljnom pripremom cijelog procesa kroz osvjetljenje, pozicioniranje te u fazi predobrade. Niz se sastoji iz sljedećih postupaka:

- Izdvajanje piksela koji u fotografiji nose podatak o nijansama zelene boje (za zelenu je boju na senzoru fotografskog aparata predviđeno dvostruko više elemenata nego pojedinačno za crvenu i plavu).
- Kreiranje maske za odabir područja za obradu. Veličina područja se određuje na temelju posljednje fotografije u nizu ako nije postignuta puna slika nošenja, odnosno jednaka je za sve fotografije nakon postizanja pune slike nošenja.
- Podešavanje kontrasta fotografije kako bi se naglasila površina boka oštećena rupičenjem.
- Podešavanje praga tolerancije tonova u cilju uklanjanja dijelova fotografije uslijed refleksije.
- Kreiranje i podešavanje maske za odvajanje tamnih dijelova fotografije koje dodiruju rubove.
- Uklanjanje šuma ili čestica preostalih nepravilnosti uz zadavanje najmanje i najveće površine čestice koju u odabiru treba odbaciti.
- Zatvaranje konture objekata uz zadavanje uvjeta spojivosti.
- Uklanjanje otoka ili uključaka, izoliranih dijelova unutar kontura objekata.
- Analiza preostalih objekata.
- Određivanje konture preostalih objekata.
- Iscrtavanje nađenih kontura na izvornoj fotografiji te kreiranje nove.

Najvažniji rezultat analize je veličina površina oštećena rupičenjem za svaki bok zuba ponaosob za određen broj ciklusa izmjene opterećenja. Zbrajanjem svih parcijalnih površina određuje se ukupna fotografirana površina oštećenja bokova zuba pužnog kola. Dobivena se vrijednost množi s faktorom uvećanja (zbog prikrate projekcije) te određuje ukupna stvarna površina oštećenja. Usporedno se prati i stupanj korisnog djelovanja i temperatura ulja u prijenosniku čime se mogu dovesti u vezu s veličinom površine oštećenja.

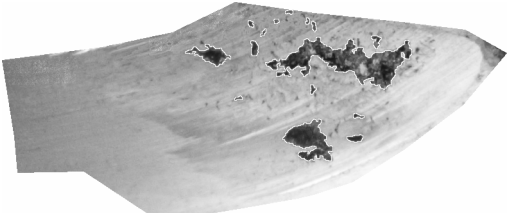
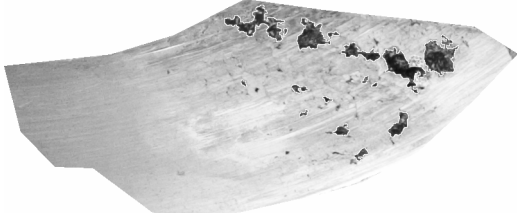
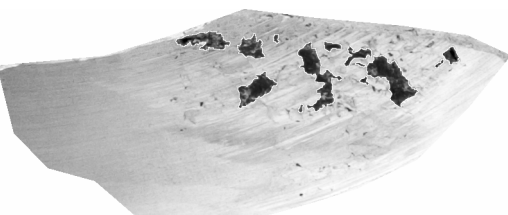
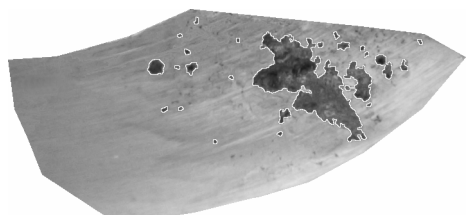
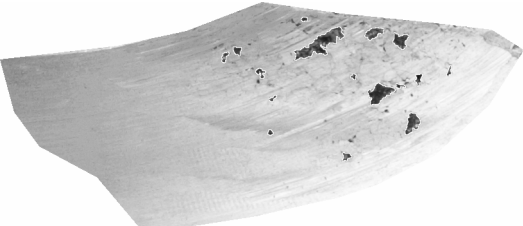
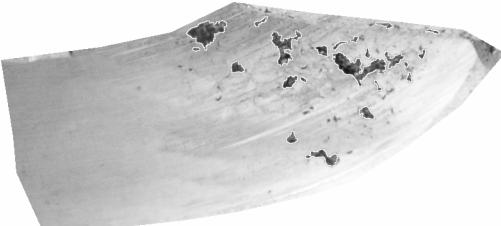
Rezultati istraživanja

Tijekom rada prijenosnika u oba ispitivana slučaja praćen je nastanak i povećanje površina bokova oštećenih rupičenjem. Za vrijeme rada, također u oba slučaja, praćena je promjena zakretnog momenta na ulaznom i izlaznom vratilu te temperatura ulja (neposredno ispod pužnog vijka). Radi prirode procesa rupičenja i velikog broja izmjena neprekidno praćenje bi rezultiralo velikom količinom podataka pa su mjerenja provedena periodički. Analizom i sintezom navedenih podataka trebao bi se dati odgovor o karakteru promjena te njihovom utjecaju na rad prijenosnika.

10.1 Oštećenja rupičenjem pužnog kola AlSn6

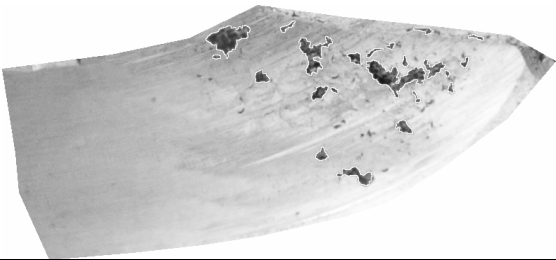
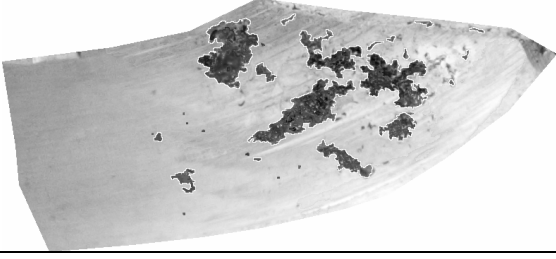
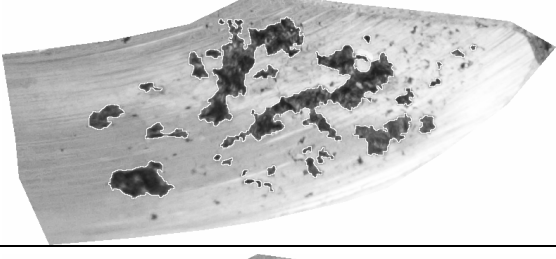
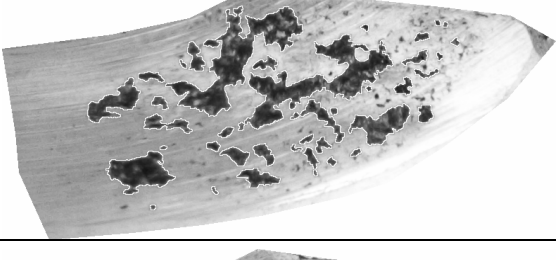
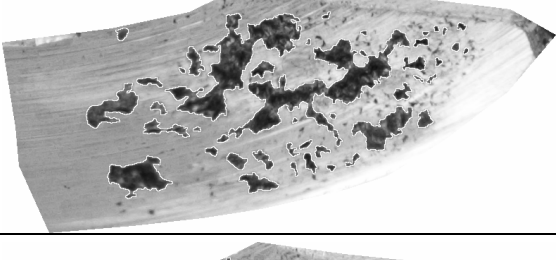
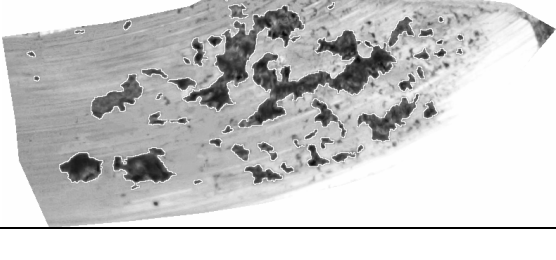
Prva oštećenja bokova pužnog kola od materijala AlSn6 zabilježena su nakon $5,3 \cdot 10^5$, a u iznosu od prosječno 1,2% površine (prosjek udjela površine oštećenja na 6 zuba) zabilježena su nakon $7,54 \cdot 10^5$ promjena opterećenja (tablica 10.1). Oštećenja se nalaze u području izlazne strane bokova, nepravilno razmještena u polju zahvata, a površine su u rasponu od 1,28 do $4,95 \text{ mm}^2$. Raspored oštećenja ne indicira zakonitost kojom bi bilo moguće utvrditi ili predvidjeti mjesto pojave ili smjer napredovanja. Pored možebitne nehomogenosti materijala te utjecaja produkata trošenja, greške radijalne i aksijalne točnosti vrtnje kao i razlike u koracima između pojedinih zuba mogu biti uzrok ovakve slike oštećenja, naročito kada se uzme u obzir debljina uljnog filma (proračunska debljina uljnog filma se, zavisno od modela, kreće u granicama od 0,7 do $1,4 \mu\text{m}$ prema [25], a prema izrazu 5.13 [6] srednja debljina bi iznosila $0,28 \mu\text{m}$).

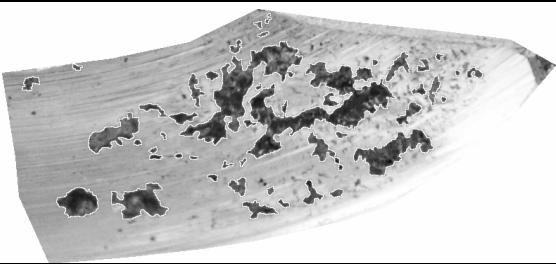
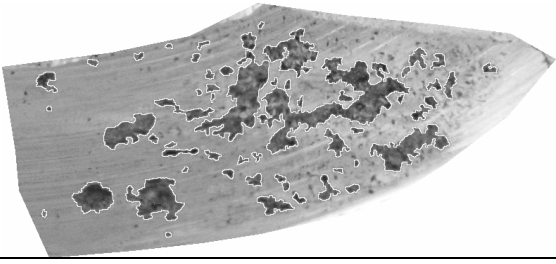
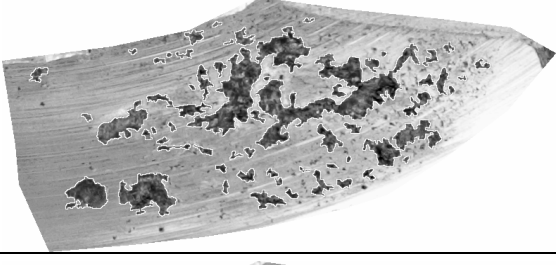
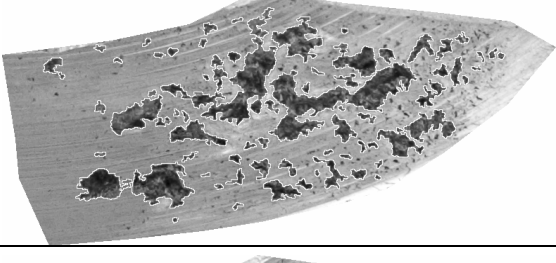
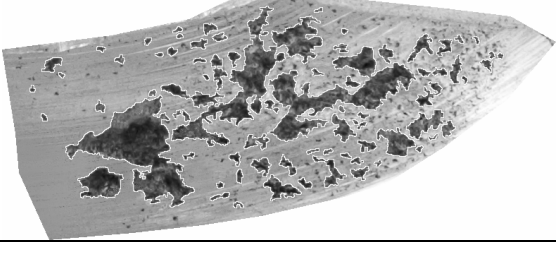
Tablica 10.1 Oštećenje rupičenjem bokova zuba 1-6 nakon $7,54 \cdot 10^5$ promjena

Zub br. 1, 3,86 mm ² , 1,5% PP	Zub br. 2, 2,92 mm ² , 1,1% PP
	
Zub br. 3, 3,37 mm ² , 1,3% PP	Zub br. 4, 4,95 mm ² , 1,9% PP
	
Zub br. 5, 1,28 mm ² , 0,5% PP	Zub br. 6, 2,11 mm ² , 0,8% PP
	

Već je prije opisano stanje površine oštećeno rupičenjem (poglavlje 5) te navedeno da se udio oštećenja, poradi ispadanja dijelova bokova, mijenja skokovito. Nizom fotografija načinjenih tijekom praćenja rada prijenosnika zabilježene su pojedine osobitosti u promjenama površina oštećenja te utjecaja kliznog trošenja na iste (tablica 10.2). Nakon prvog zabilježenog oštećenja (1. red), površina se povećava za više od 3 puta (2. red). Oštećenja su plitka i karakteristična za rupičenje. Tijekom nastavka rada površina oštećenja poprima stabilnu vrijednost. Lokalno su, međutim, vidljive stalne oscilacije.

Tablica 10.2 Oštećenja rupičenjem na izlaznoj strani boka zuba broj 6 pužnog kola AlSn6

Redni broj	Sati Ciklusi	Fotografija boka	Pov. oštećenja mm ² /%PP
1	158 7,54E5		2,11 0,8% PP
2	263 1,27E6		6,55 2,5% PP
3	399 1,93E6		8,52 3,3% PP
4	464 2,24E6		10,76 4,2% PP
5	547 2,64E6		10,56 4,08% PP
6	621 3,00E6		10,52 4,07% PP

Redni broj	Sati Ciklusi	Fotografija boka	Pov. oštećenja mm ² /%PP
7	730 3,53E6		10,28 3,97% PP
8	826,5 3,99E6		10,78 4,17% PP
9	903 4,36E6		11,00 4,25% PP
10	983 4,75E6		12,47 4,7% PP
11	1038,3 5,02E6		14,54 5,0% PP

Provođenjem postupka kako je prije naznačeno (poglavlje 9) fotografije zuba su digitalno obrađene te određene površine oštećenja. Slika 10.1 prikazuje zub broj 6 nakon prestanka rada prijenosnika.



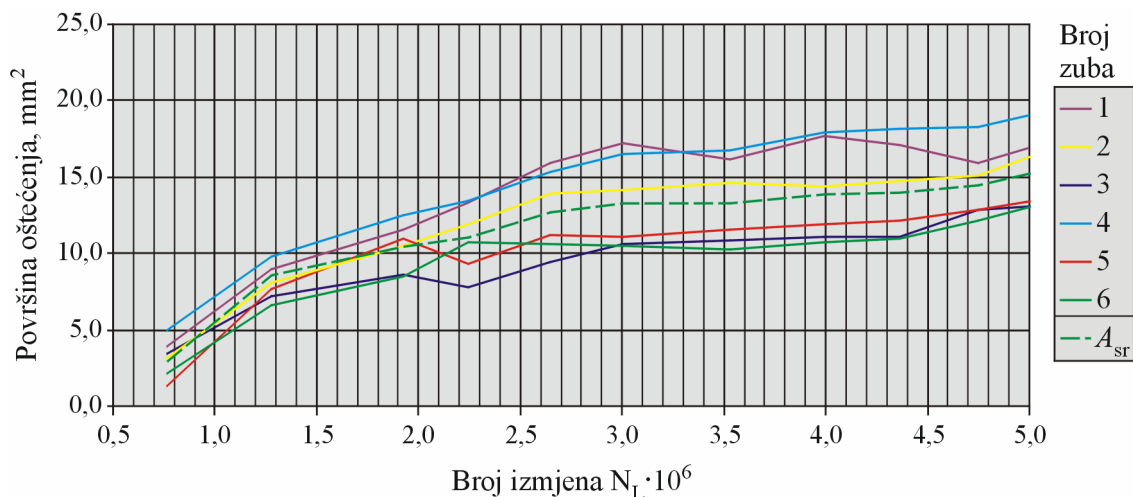
Slika 10.1 Zub br. 6 pužnog kola AlSn6 nakon $5,02 \cdot 10^6$ izmjena

Budući da su oštećenja na svim odabranim bokovima nađena na izlaznoj strani¹⁷ za određivanje površine se koristi odgovarajući faktor prikrate (tablica 7.3). Navedene numeričke vrijednosti su prikazane u tablici 10.3 te dijagramom na slici 10.2.

Tablica 10.3 Površine oštećenja bokova zuba kola AlSn6 (u mm²)

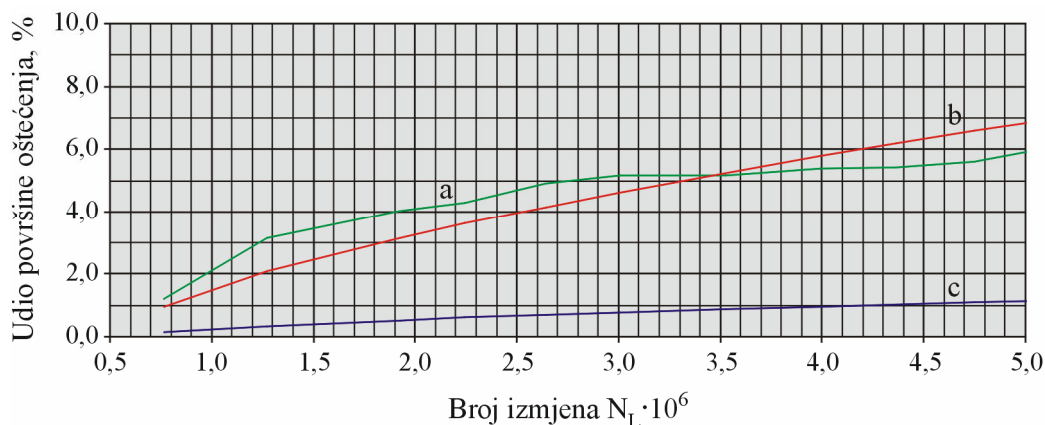
Broj ciklusa	Broj zuba						A_{sr}
	1	2	3	4	5	6	
7,64E+05	3,86	2,91	3,37	4,95	1,28	2,11	3,08
1,27E+06	8,98	8,59	7,25	9,83	7,67	6,55	8,14
1,93E+06	11,55	10,48	8,64	12,55	10,94	8,52	10,45
2,24E+06	13,34	11,86	7,74	13,46	9,33	10,75	11,08
2,64E+06	15,89	13,88	9,39	15,38	11,20	10,56	12,71
3,00E+06	17,24	14,11	10,61	16,50	11,07	10,52	13,34
3,53E+06	16,19	14,58	10,84	16,77	11,56	10,27	13,37
3,99E+06	17,68	14,33	11,07	17,87	11,93	10,78	13,94
4,36E+06	17,08	14,74	11,13	18,18	12,19	11,00	14,05
4,75E+06	15,94	15,13	12,81	18,25	12,82	12,13	14,51
5,02E+06	16,94	16,40	13,06	19,10	13,40	13,06	15,33

¹⁷ Uz dulji period rada oštećenja rupičenjem bi nestala ili se pojavila i lijevo od normalne ravnine, na ulaznoj strani boka.



Slika 10.2 Površine oštećenja u zavisnosti od broja ciklusa za pužno kolo od AISn6

Dijagramom na slici 10.2 prikazana su promjene površina oštećenja rupičenjem za odabrane zube pužnog kola, a srednja vrijednost je prikazana crtkanom linijom. Promjene kvalitativno imaju isti trend uz lokalne oscilacije. Iz prikupljenih podataka nije moguće postaviti pravilo koje bi dovelo u vezu oscilacije površina oštećenja između pojedinih zuba. S porastom broja izmjena opterećenja površine oštećenja na svim zubima pokazuju tendenciju rasta.



Slika 10.3 Udjeli površine oštećenja za pužno kolo od AISn6

a) srednja vrijednost udjela površine oštećenja prema površini boka

b) udjeli oštećenja prema modelu trošenja dobivenom na temelju pokusa

c) udjeli oštećenja prema modelu trošenja iz [4] primijenjenom na nazivni moment iz pokusa

Formulacija modela trošenja (po uzoru na [2] i [4]) se postavlja na temelju podataka o srednjoj vrijednosti udjela površina oštećenja (krivulja a, slika 10.3), broju promjena i broja promjena kod koje je uočena pojava rupičenja. Izrazom 5.30 zavisnost je izražena u obliku

$$N_p \approx k_N \cdot P_p^{1,5} + N_{p0}.$$

Regresijom nad podacima o udjelima površina oštećenja i brojevima ciklusa nađena je vrijednost faktora $k_N \approx 2,499 \cdot 10^8$ gdje je broj ciklusa prije pojave prvog oštećenja $N_{p0} \approx 5,3 \cdot 10^5$. Konačan oblik modela za ispitivani slučaj glasi:

$$N_p \approx 2,499 \cdot 10^8 \cdot P_p^{1,5} + 5,3 \cdot 10^5. \quad 10.1$$

Udio površine oštećenja u zavisnosti od broja izmjena i broju izmjena do pojave oštećenja za nazivni moment i moment različit od nazivnog može se odrediti iz sljedećih izraza:

$$P_p \approx \left(\frac{N_p - 5,3 \cdot 10^5}{2,499 \cdot 10^8} \right)^{2/3}, \quad 10.2$$

$$P_p \approx \left(\frac{T_2^3 (N_p - N_{p0})}{8,57 \cdot 10^{13}} \right)^{2/3}, \quad 10.3$$

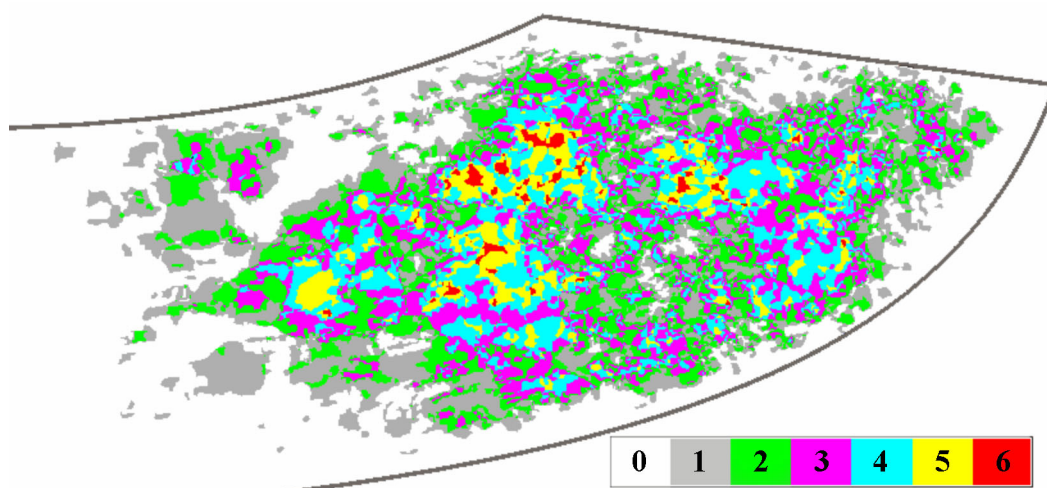
odnosno, u skladu s nomenklaturom prema [6] i [7]:

$$A_p \approx \left(\frac{T_2^3 (N_L - N_{LI})}{8,57 \cdot 10^{13}} \right)^{2/3}. \quad 10.4$$

Temeljem dobivenog izraza 10.3 odnosno 10.4 ucrtana je na dijagramu (slika 10.3, krivulja b) promjena udjela površine oštećene rupičenjem u zavisnosti o broju promjena opterećenja. Na istoj slici krivulja c je dobivena temeljem modela prema [4] za nazivno opterećenje pužnog kola AlSn6 iz ovog rada. Očigledno je da potonji model (za nazivno opterećenje od 180 Nm i jednaku brzinu vrtnje) predviđa manje udjele oštećenja. Nasuprot tome, izraz 10.4 uz uvjete prema [4] predviđa udio oštećenja od približno 45% za $5 \cdot 10^6$ izmjena opterećenja što približno 5,5 puta više obzirom na rezultate prema slici 5.9. Ovakav trend je poznat iz rezultata istraživanja prema [2] gdje je pokazano da ukupni gubici za slučaj podmazivanja uljima mineralne baze prate formu parabole. Opterećenja niža i viša od optimalnog (najmanji gubici) dovode do porasta gubitaka. Iz izraza 5.13 može se vidjeti da između opterećenja i debljine uljnog filma postoji obrnuta proporcionalnost: s padom opterećenja predviđa se povećanje debljine uljnog filma što je u suprotnosti s izmjerenim veličinama oštećenja. Na temelju navedenog može se zaključiti da se mehanizmi podmazivanja za istu geometriju pužnog para te istu brzinu vrtnje značajno razlikuju zavisno od opterećenja.

Prema [6] periodi pojave i napredovanja rupičenja (izrazi 5.23 i 5.24, poglavlje 5.1.2) izraženi su u zavisnosti o brzini klizanja na srednjem promjeru za promatrani i referentni slučaj, srednjem dodirnom pritisku i granici dodirne izdržljivosti materijala pužnog kola. Navedeni model procjene trajnosti pužnog kola obzirom na rupičenje nije podesan za promatrani slučaj zbog ograničenog područja primjene. Kako bi se navedene veličine dovele u vezu i za materijal AlSn6 bilo bi potrebno provesti veći broj ispitivanja s više mjernih točaka za različite brzine klizanja te različita opterećenja, a dobivene podatke obraditi npr. višestrukom linearnom regresijom.

Važno je primijetiti da se površine oštećenja za isti broj ciklusa razlikuju u svim mjernim točkama, odnosno u pojedinim periodima pokazuju različite trendove rasta ili pada. Iz navedenog se međutim ne može zaključiti kakav je raspored oštećenja na pojedinim bokovima. Kako bi se prikazao raspored oštećenja na pojedinim zubima, odnosno pronašao možebitni pravilan uzorak, provedeno je preklapanje obrisa površina dobivenih iz posljednjeg slijeda fotografija (slika 10.4). Površine oštećenja su zamijenjene ekvivalentnim područjima jednakog sivog tona, a primjenom pretvornika množenja omogućen je efekt preklapanja. Budući da područja predstavljaju površine realnih oštećenja preklapanjem se mogu naznačiti oni dijelovi gdje su oštećenja učestalija, odnosno prisutna na većem broju zuba. U tom smislu bijela pozadina predstavlja dio bokova gdje nema oštećenja niti na jednom odabranom zubu, a pojedine boje naznačuju određeni broj preklapanja.¹⁸ Obzirom na možebitne geometrijske razlike između pojedinih zuba (mogućnosti greške u preklapanju bokova) ovakva predodžba ima više indikativnu vrijednost.



Slika 10.4 Preklapanje površina oštećenja kola AlSn6 pretvornikom množenja

Razvidno je na slici 3 da učestalost pojave oštećenja na približno istoj poziciji bokova svih, odnosno 5 odabranih zuba nije velika (crvena i žuta područja). Nešto veći udio preklapanja se odnosi na 2, 3 i 4 zuba, a najveći udio otpada na površine koje su svojstvene samo pojedinim zubima. Zajednički nazivnik svim područjima je raspršenost po izlaznoj strani boka zubi bez mogućnosti iznalaženja pravilnog uzorka u preklapanju oštećenja. Postupkom koji je identičan određivanju površina oštećenja iz fotografija bokova zuba određen je udio pojedinih područja u uniji površina oštećenja svih 6 odabranih zuba (tablica 10.4).

¹⁸ Površine oštećenja svih odabranih zuba su prvobitno prikazane jednakim sivim tonom. Uporaba sivih tonova je neophodna radi postupka, ali rezultati nemaju dovoljnu preglednost. Nakon postupka preklapanja sivi su tonovi zamijenjeni pojedinim bojama.

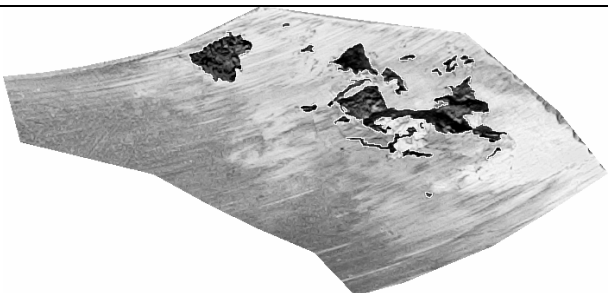
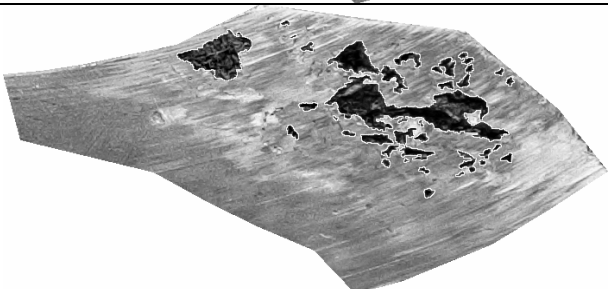
Tablica 10.4 Udio učestalosti oštećenja na odabranim zubima pužnog kola AlSn6

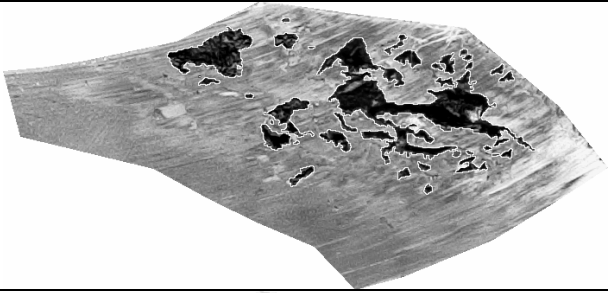
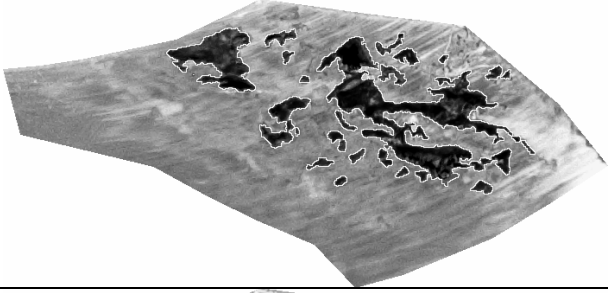
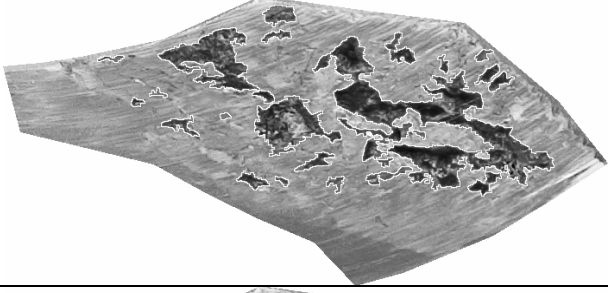
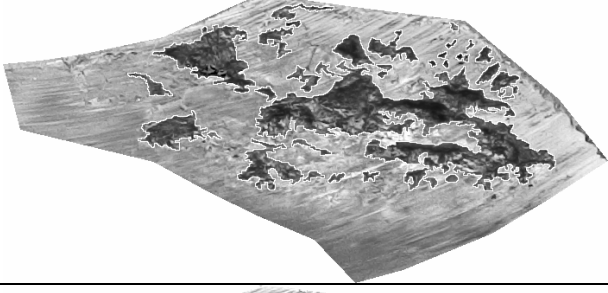
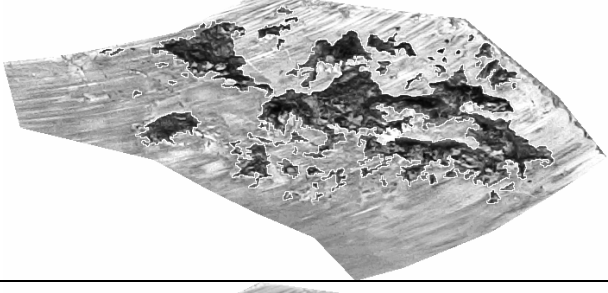
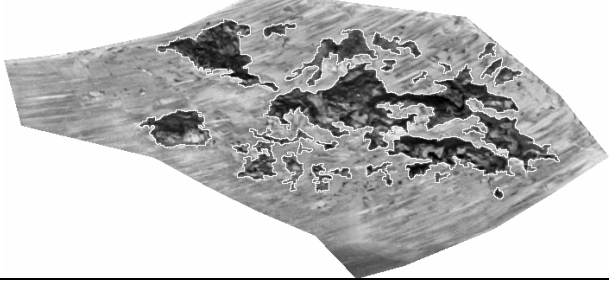
	Broj zubi u preklapanju (1 – nema preklapanja)					
	1	2	3	4	5	6
Udjeli, %	29,12	22,25	23,90	16,24	7,10	1,39

10.2 Oštećenja rupičenjem pužnog kola CuSn12

Analogno prethodnom provedeno je ispitivanje prijenosnika s pužnim kolom od materijala CuSn12. Obzirom na razlike u karakteristikama materijala te na temelju rezultata drugih autora [2, 4] površine oštećenja u ovom slučaju trebale bi biti manje za veći nazivni zakretni moment, a broj ciklusa prije pojave prvih oštećenja bi trebao biti veći. Prva oštećenja bokova pužnog kola od materijala CuSn12 u iznosu od prosječno 0,76% (prosjeck udjela površine oštećenja na 6 promatranih zuba) zabilježena su nakon $1,45 \cdot 10^6$ ciklusa promjena opterećenja (tablica 10.5) što je očekivano veći broj izmjena nego kod prethodno ispitivanog kola. Kao i kod prethodnog pužnog kola raspored oštećenja ne indicira zakonitost kojom bi bilo moguće utvrditi ili predvidjeti mjesto pojave ili smjer napredovanja. Tablica 6 prikazuje promjene površine oštećenja na izlaznom dijelu boka zuba broj 6 kroz sve faze rada.

Tablica 10.5 Izlazna strana boka zuba br. 6 pužnog kola CuSn12

Redni broj	Sati Ciklusi	Fotografija boka	Pov. oštećenja $\text{mm}^2/\%PP$
1	301 $1,45E+06$		2,18 0,93% PP
2	473 $2,29E+06$		4,11 1,75% PP

Redni broj	Sati Ciklusi	Fotografija boka	Pov. oštećenja mm ² /‰PP
3	582 2,81E+06		4,63 1,97% PP
4	694 3,36E+06		6,04 2,6% PP
5	831 4,02E+06		7,1 3,0% PP
6	954 4,61E+06		8,8 3,7% PP
7	989 4,78E+06		9,2 3,9% PP
8	1045 5,05E+06		8,9 3,8% PP

Za razliku od pužnog kola od materijala AlSn6 kod predmetnog kola pojava početnog rupičenja nije izražena. Razlog ovakvom razvoju oštećenja može biti u relativno niskom opterećenju obzirom na granične vrijednosti propisane za kola načinjena od materijala CuSn12. Slika 10.5 prikazuje oštećenja na boku zuba broj 6 nakon završetka rada u posljednjoj fazi.



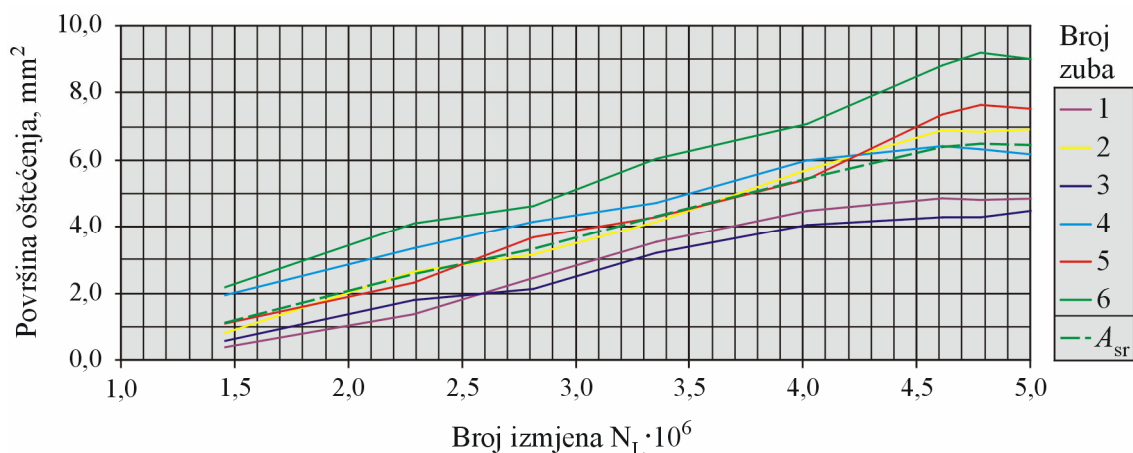
Slika 10.5 Zub br. 6 pužnog kola CuSn12 nakon $4,67 \cdot 10^6$ izmjena

Kao i u slučaju prvog ispitivanog kola oštećenja se nalaze samo u području izlazne strane pa su i konačne površine oštećenja (tablica 10.6) dobivene uporabom istog faktora prikrate. Podaci o promjeni površina oštećenja iz tablice 10.6 prikazani su dijagramom na slici 10.6.

Tablica 10.6 Površine oštećenja odabranih bokova zuba CuSn12 (u mm²)

Broj ciklusa	Broj zuba						A_{sr}
	1	2	3	4	5	6	
1,45E+06	0,36	0,82	0,54	1,91	1,11	2,18	1,15
2,29E+06	1,38	2,65	1,79	3,34	2,30	4,11	2,60
2,81E+06	2,45	3,14	2,12	4,16	3,68	4,63	3,36
3,36E+06	3,53	4,15	3,20	4,71	4,30	6,04	4,32
4,02E+06	4,47	5,69	4,08	6,00	5,42	7,06	5,45
4,61E+06	4,86	6,90	4,27	6,43	7,36	8,80	6,44
4,78E+06	4,82	6,86	4,31	6,31	7,62	9,18	6,52
5,05E+06	4,86	6,94	4,51	6,12	7,51	8,94	6,48

Općenito se može reći da krivulje promjene površina oštećenja s brojem izmjena opterećenja pokazuju slične trendove kao i za slučaj pužnog kola od materijala AlSn6: uz određeno rasipanje vrijednosti kod svih se krivulja manifestiraju oscilacije, a s porastom broja izmjena površine oštećenja uglavnom rastu. Srednja vrijednost površina oštećenja (slika 10.6) se preklapa s površinama na zubima 2 i 5.



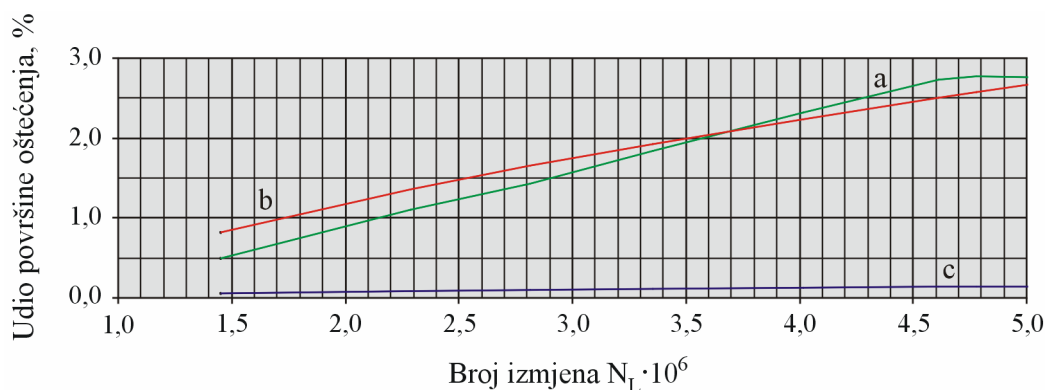
Slika 10.6 Površine oštećenja u zavisnosti od broja ciklusa za kolo CuSn12

Na temelju prikupljenih podataka formulirana je zavisnost udjela površine oštećenja o broju izmjena opterećenja analogno ispitivanju pužnog kola od materijala AlSn6 te dobiveni izrazi za nazivni i proizvoljni moment opterećenja:

$$P_p \approx \left(\frac{N_p - 7,26 \cdot 10^5}{9,84 \cdot 10^8} \right)^{2/3}, \quad 10.5$$

$$P_p \approx \left(\frac{T_2^3 (N_p - N_{p0})}{7,18 \cdot 10^{14}} \right)^{2/3}. \quad 10.6$$

Srednja vrijednost udjela površine oštećenja (slika 10.6), dijagram prema izrazu 10.5 i model prema [2] sveden na nazivno ispitno opterećenje pužnog kola od materijala CuSn12 u ovom radu prikazani su slikom 10.7.



Slika 10.7 Udjeli površine oštećenja za pužno kolo od CuSn12

a) srednja vrijednost udjela površine oštećenja prema površini boka

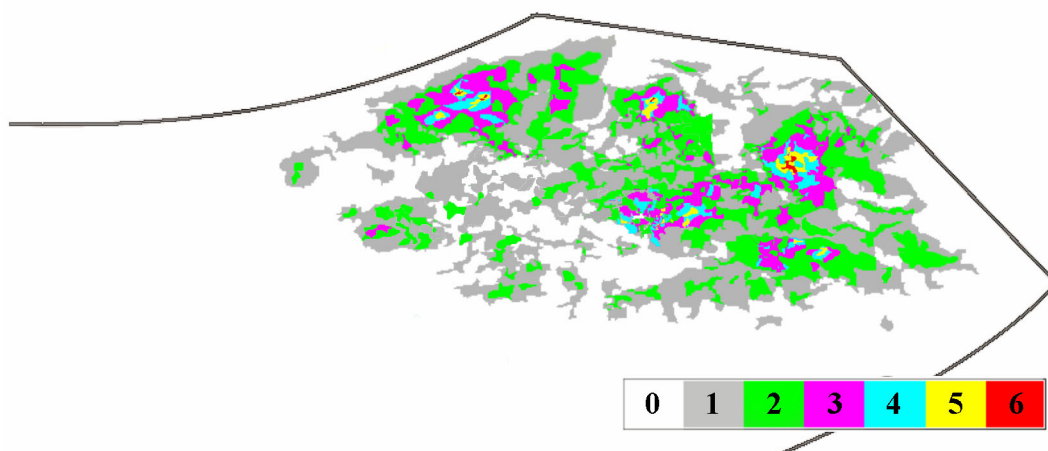
b) udjeli oštećenja prema modelu trošenja dobivenom na temelju pokusa

c) udjeli oštećenja prema modelu trošenja iz [2] primijenjenom na nazivni moment iz pokusa

I u ovom su slučaju srednje vrijednosti udjela oštećenja dobivene mjerenjem (slika 10.7, krivulja a) dobro aproksimirane modelom prema izrazu 10.5. Vrijednosti dobivene prilagodbom modela prema [2] (nazivni moment 500 Nm i jednaka brzina vrtnje)

predviđaju znatno manje udjele oštećenja od izmjerenih. Također, model prema izrazu 10.6 primijenjen na moment od 500 Nm (prema [2]) predviđa za $5 \cdot 10^6$ izmjena približno 7,5 puta veći udio površine oštećenja. Zaključak je stoga analogan onomu za pužno kolo od materijala AlSn6.

Već opisanim postupkom načinjena je na temelju posljednjeg slijeda fotografija mapa oštećenja rupičenjem (slika 10.8). Kao i kod prethodnog pužnog kola niti u ovom slučaju nije moguće pronaći uzorak koji bi objedinio područja oštećenja na promatranim zubima. Obradom slike utvrđeni su udjeli pojedinih područja u uniji površina oštećenja bokova zuba (tablica 10.7).



Slika 10.8 Preklapanje površina oštećenja kola CuSn12 pretvornikom množenja

Tablica 10.7 Udio učestalosti oštećenja na odabranim zubima pužnog kola CuSn12

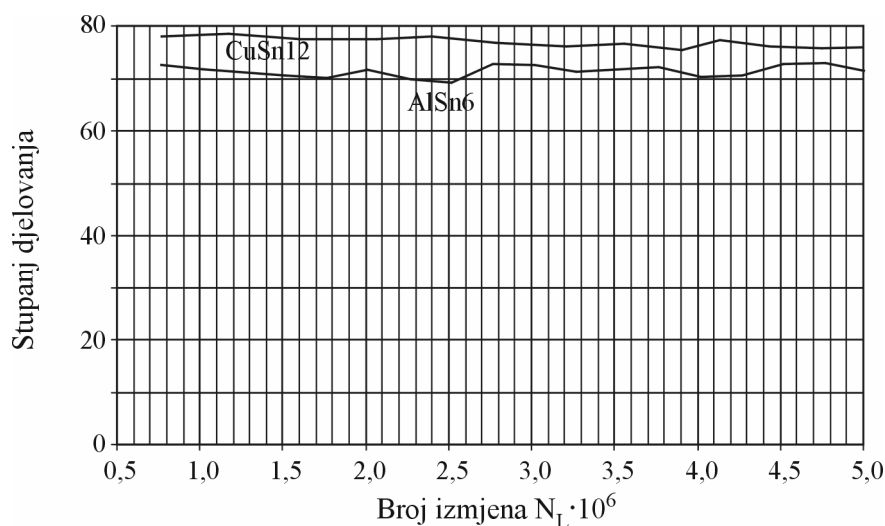
	Broj zubi u preklapanju (1 – nema preklapanja)					
	1	2	3	4	5	6
Udjeli, %	49,6	37,3	11,5	1,5	0,1	≈ 0

Vjerojatno je da bi za opterećenja bliža graničnim vrijednostima udio preklapanja bio veći za veći broj zuba, međutim nakon gotovo 1000 sati rada nije uspostavljena slika oštećenja koja bi opravdala zaključak o lokaliziranom mjestu nastanka početnog rupičenja niti o možebitnom smjeru napredovanja. Nameće se zaključak da je dinamička izdržljivost materijala u kontekstu pužnih prijenosnika slučajna veličina.

10.3 Rezultati praćenja iskoristivosti

Iskoristivost je kod ispitivanih pužnih prijenosnika praćena posredno, istovremenim mjerenjem zakretnog momenta na ulaznom i izlaznom vratilu (poglavlja 8 i 12). Kako bi se postigao kompromis između kontinuiranog praćenja promjena i velike količine podataka uspostavljen je sustav periodičkog praćenja na način da se svakih 120 sekundi provodi

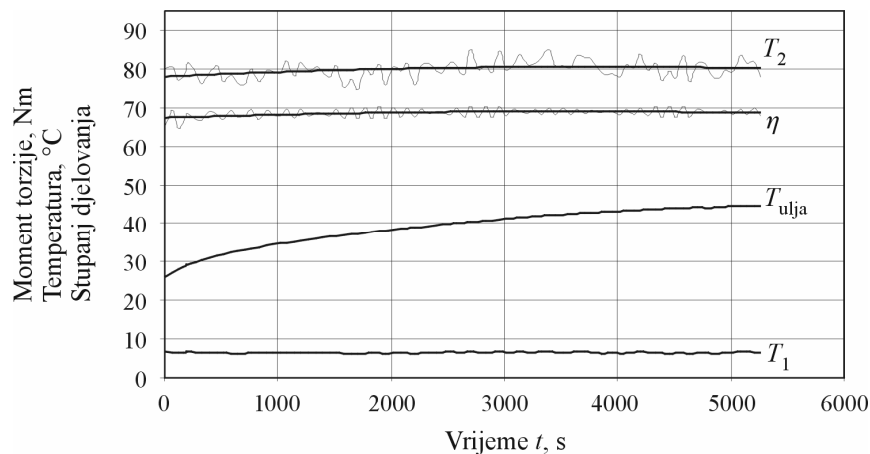
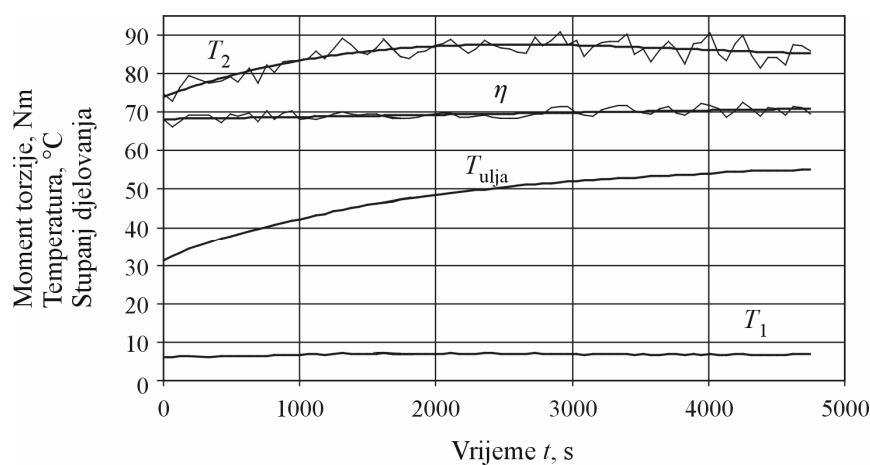
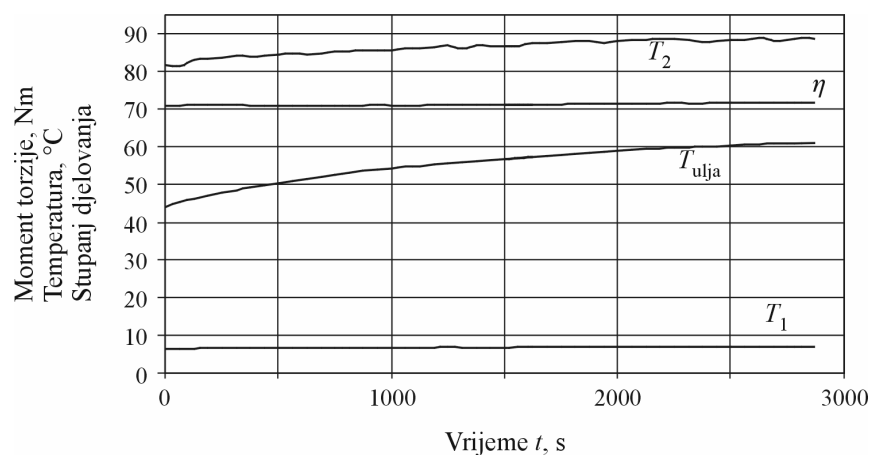
mjerenje u trajanju od 1 do 4 sekunde s frekvencijom uzrokovanja od 200 uzoraka. Prikupljanjem srednjih vrijednosti stupnja korisnog djelovanja preko ukupnog perioda trajanja ispitivanja načinjen je dijagram prikazan slikom 10.9. U određivanju srednjih vrijednosti uzimani su u obzir stabilni periodi rada bez prijelaznih pojava (npr. puštanje u rad, stabilizacija temperature, prekid rada).



Slika 10.9 Prosječni stupnjevi djelovanja ispitivanih prijenosnika

Periodi pada stupnja korisnog djelovanja prijenosnika mogu se neposredno povezati s prirastom površine oštećene rupičenjem (slike 10.3 i 10.7). Ovaj utjecaj nije izoliran, odnosno na temelju prikupljenih podataka nije moguće jednoznačno postaviti uzročno-posljedičnu vezu. Naime, razmatranje samo povećanja površine oštećene rupičenjem ne daje jasnu sliku o zakonitosti po kojoj se stupanj korisnog djelovanja mijenja budući da nakon prijelaznog perioda (najveće površine oštećenja tijekom početnog rupičenja) on poprima vrijednosti koje se ne razlikuju značajno od početnih.

Tijekom ispitivanja prijenosnika s pužnim kolom od materijala AlSn6 provedeno je i jednokratno mjerenje za tri dodatne brzine klizanja v_g : 0,695, 1,39 i 1,93 m/s (slike 10.10, 10.11 i 10.12). Ispitivanje je provedeno nakon $3,5 \cdot 10^6$ izmjena opterećenja s udjelom površine oštećenja rupičenjem od približno 5,1%, a kočenje je provedeno direktno na prirubnici između multiplikatora i hidrauličke kočnice koja je, u ovom slučaju, stavljena van pogona. Trajanje mjerenja određeno je prirastom temperature ulja, a pogon se zaustavlja kada je manji od $0,2^\circ\text{C}/\text{min}$. Početni period rada na dijagramima nije prikazan.


 Slika 10.10 Momenti torzije, temperatura i stupanj djelovanja za $v_g=0,695$ m/s

 Slika 10.11 Momenti torzije, temperatura i stupanj djelovanja za $v_g=1,39$ m/s

 Slika 10.12 Momenti torzije, temperatura i stupanj djelovanja za $v_g=1,93$ m/s

Usporedbom dijagrama može se primijetiti sljedeće:

- pri manjim brzinama klizanja rad je nestabilan pa postoje veće oscilacije izlaznog momenta (za brzine klizanja 0,695 i 1,39 m/s prikazane su srednje vrijednosti izlaznog momenta i stupnja djelovanja polinomom 2. stupnja; kod brzine klizanja

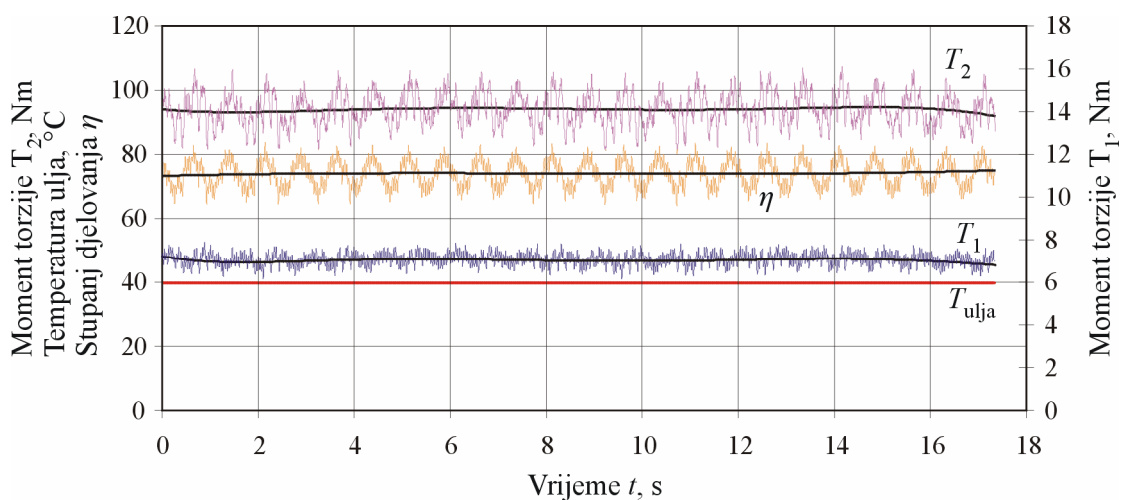
od 1,93 m/s se polinom 2. stupnja dobro poklapa s izvornim podacima pa nije prikazan),

- s porastom brzine klizanja, uz isto ulazno opterećenje, rastu temperatura ulja (mjerena neposredno ispod pužnog vijka) i izlazni moment. Prosječni stupanj djelovanja za tri navedene brzine klizanja iznosio je 68,6%, 69,6% i 71,2%. Za nazivnu brzinu klizanja od 2,8 m/s utvrđena je prosječna vrijednost od 72,6%,
- nije moguće, za ovaj konkretan slučaj, pronaći negativan utjecaj površine oštećenja na stupanj korisnog djelovanja.

Jasno je da navedeni zaključci vrijede samo za promatrani slučaj. Naime, poznat je utjecaj temperature na ulje, ali u konkretnom slučaju nije određena veza između temperature i momenta pa nije vidljivo nakon kojeg bi opterećenja stupanj korisnog djelovanja počeo pokazivati tendenciju pada.

Tijekom ispitivanja s pužnim kolom od materijala CuSn12 načinjen je dodatni pokus i to vezano uz rad prijenosnika bez ulja.

Pokus je proveden s namjerom da se kvalitativno utvrdi utjecaj geometrije na stupanj djelovanja, dakle u slučaju graničnog podmazivanja (čišćenje pužnog para nije provedeno, odnosno ulje je prisutno samo na površinama). Vrijeme trajanje pokusa je ograničeno na najviše 20 sekundi budući da nema povratne informacije o temperaturi ulja. U tom smislu je temperatura naznačena u dijagramu na slici 10.13 temperatura unutrašnjosti prijenosnika. Može se zaključiti da je i mala količina ulja, za kratko vrijeme trajanja pokusa, dostatna kako stupanj korisnog djelovanja ne bi značajno pao. S druge strane, može se naglasiti utjecaj geometrijskih osobina pužnog para odnosno ograničenja koja iz njih proizlaze. Jasno je da bi u dužem vremenskom periodu nedostatak ulja negativno djelovao na stupanj korisnog djelovanja, poglavito poradi nedostatnog hlađenja.



Slika 10.13 Momenti torzije i stupanj djelovanja za kratkotrajan rad bez ulja

Zaključak

Provedeno je istraživanje utjecaja točnosti mjerenja površina oštećenja rupičenjem bokova zuba pužnih kola na kvantificiranje zakonitosti promjene tog oblika trošenja u zavisnosti o iznosu i broju ciklusa izmjena opterećenja. Ispitivanjem su obuhvaćena pužna kola načinjena od materijala AlSn6 i CuSn12 pogonjena pužnim vijcima načinjenim od materijala 16MnCr5. Tijekom rada je praćena iskoristivost prijenosnika kako bi se utvrdila možebitna zavisnost o površini oštećenja.

Uporaba digitalne fotografije u istraživanju je potaknuta uvidom u postojeće radove iz područja pužnih prijenosnika [2, 4] a poglavito metoda mjerenja površina oštećenih rupičenjem. Uporaba planimetra, mjernog instrumenta korištenog za određivanje površina oštećenja u navedenim radovima, uvjetovana je tehnološkim dostignućima tog vremena te je vjerojatno predstavljala optimalno rješenje. Prema [49] međutim nađeno je da je greška mjerenja obrnuto proporcionalna veličini površine koja se mjeri te teoretski može iznositi 6% do 12% za površine od 10 mm^2 , zavisno od izvedbe mjernog instrumenta. Za površine manje od 1 mm^2 greška mjerenja asimptotski teži u beskonačnost, odnosno ukazuje na nemogućnost primjene planimetra kao mjernog instrumenta za tu namjenu. Greška mjerenja metodom korištenom u ovom radu određena je rezolucijom fotografije i uvjetima fotografiranja, a u relativnim iznosima ne zavisi o veličini promatrane površine. Analiza rezultata istraživanja za oba materijala i broj izmjena do $5 \cdot 10^6$ je pokazala velik udio pojedinih površina oštećenja manjih od 5 mm^2 pa bi stoga prednost u određivanju površina oštećenja trebalo dati tehnološki naprednijoj metodi. Usporedbom postojećih rezultata dobivenih planimetriranjem površina oštećenja na tradicionalnim fotografijama i rezultata dobivenih analizom digitalnih fotografija nađene su razlike i do 25%. Može se zaključiti da je primjenom u radu korištene metode moguće kvantitativno točnije odrediti površine oštećenja rupičenjem te da je ista prikladna za tu namjenu.

Vezano uz tijek procesa razaranja površina bokova zuba rezultati analize prikupljenih i obrađenih podataka za broj izmjena do $5 \cdot 10^6$ pokazuju sljedeće:

- rupičenje nastaje na većini zuba u relativno uskom vremenskom periodu: na pužnom kolu AlSn6 unutar $2 \cdot 10^5$, a na pužnom kolu CuSn12 unutar $4 \cdot 10^5$ izmjena.
- u navedenom trajanju ispitivanja oštećenja se nalaze na izlaznoj strani bokova
- kod oštećenja manjih površina ($<1 \text{ mm}^2$) se podjednako pokazala tendencija napredovanja kao i iščezavanja
- povećanjem broja izmjena dolazi do povezivanja pojedinih oštećenja napredovanjem pukotina te nastajanja većih cjelovitih površina, u početku na izlaznoj strani, a zatim s tendencijom razvoja prema ulaznoj. U većem je broju slučajeva mreža pukotina vidljiva prije samog odvajanja čestica.
- razlike u veličinama oštećenja između pojedinih zuba se kreću od 0,5 do 35%.
- površine oštećenja su nepravilnog oblika
- prirast površine oštećenja nije nužno uvijek pozitivan, a uvjetovan je dinamikom odnosa kliznog trošenja, rupičenja i abrazije.

Pobrojana opažanja se odnose na pužna kola od oba ispitivana materijala i različita opterećenja.

Neujednačenost iznosa površina oštećenja te njihov nepravilan raspored može se tumačiti na dva načina:

- raspodjelom opterećenja uslijed grešaka u točnosti izrade pužnih kola. Obzirom na nepovoljne uvjete podmazivanja debljina uljnog filma može biti do dva reda veličine manja od dopuštenih odstupanja u izradi.
- greškama u homogenosti materijala kako je prikazano rezultatima istraživanja dinamičke izdržljivosti kod kugličnih ležajeva [50].

Obzirom na prisutnost obje pojave vjerojatan je njihov istovremeni utjecaj na krajnji rezultat.

Dijagramima prikazani udjeli oštećenja rupičenjem za ispitivana pužna kola skokovito mijenjaju vrijednosti s vidljivo izraženim lomovima, a isti je trend promjene nađen i u rezultatima istraživanja prema [2, 4]. Kako s povećanjem udjela oštećenja pada iznos korisne dodirne površine odnosno dužine dodirnih linija, tako dolazi do porasta dodirnog pritiska. Budući da je klizno trošenje direktno zavisno o dodirnom pritisku povećanje udjela površine oštećene rupičenjem imati će za posljedicu povećanje brzine trošenja. U oba slučaja dolazi do intenzivnijeg odvajanja čestica s bokova zuba što rezultira pojačanim abrazivnim trošenjem. Veća brzina kliznog trošenja i abrazivno trošenje, naročito kod prijenosnika bez filtriranja maziva, mogu imati za posljedicu smanjenje ili čak iščezavanje površina oštećenja rupičenjem.

U radu su dati izrazi za određivanje udjela površine oštećenja u zavisnosti o broju izmjena i opterećenju za oba ispitivana pužna kola.

Primjenom dobivenih zakonitosti na opterećenja različita od nazivnih, a poglavito kao u radovima [2] i [4], dobivena su relativno velika odstupanja od vrijednosti dobivenih mjerenjem. Kako je to slučaj i kod zakonitosti u navedenim radovima može se zaključiti da greške mjerenja, premda vjerojatno utjecajne, nisu i jedini uzrok nepodudaranja s rezultatima mjerenja.

Analiza podataka vezana uz stupanj djelovanja za relativno male udjele površina oštećenja rupičenjem nije dala temelj za utvrđivanje međuzavisnosti između navedenih veličina. Iskoristivost pužnog kola načinjenog od materijala CuSn12 je tijekom cijelog ispitivanja bila veća nego za pužno kolo od materijala AlSn6. U radovima [2] i [4] iskoristivost nije utvrđena za ispitna opterećenja kao u ovom radu, a za veća nazivna opterećenja su dobivene veće iskoristivosti obzirom na ovdje ispitivana pužna kola.

Dosadašnja saznanja te ispitivanja provedena u ovom radu ističu moguće smjerove za daljnja istraživanja u području elemenata strojeva s klizno-valjnim dodirom, a poglavito pužnih parova:

- istraživanje dinamike i zavisnosti prevladavajućih vrsta trošenja, a naročito kliznog trošenja i rupičenja za kombinacije utjecajnih parametara (opterećenje, vrsta ulja, brzina klizanja)
- istraživanje zavisnosti iskoristivosti pužnog para o udjelu površina oštećenih rupičenjem za iste kombinacije utjecajnih parametara
- istraživanje utjecaja točnosti izrade odnosno raspodjele opterećenja između zuba u zahvatu na pojavu rupičenja.

Prilog: tehnički podaci o uređajima i opremi

Ispitni prijenosnik

Ispitno postolje

Elektromehanički dio

Elektromotor

Končar, 3~M Type 5AZ 112M-4

380 V, 9,3 A, 50 Hz

Nazivna snaga 5,5 HP

Nazivna brzina vrtnje $n=1430$ o/min

Kočnica

Junkers, hidraulička, D4k

Nazivna snaga 66kW pri 1200 o/min

Najveća brzina vrtnje $n=3000$ o/min

Najveći izlazni moment $T=500$ Nm

Multiplikator

Sever, koaksijalni B-3

Nazivni prijenosni omjer $i=14,4$

Elektronski pretvarač

Mitsubishi FR-A 500

Mjerni dio

Mjerno Pojačalo

Hottinger Baldwin Messtechnik, Spider 8

SR 55 – nositelj frekvencije

Klasa točnosti 0.1

Frekvencija uzorkovanja 1/s 1 ... 9600

Nosiva frekvencija Hz 4800

SR 01 - analog

Klasa točnosti 0.2

Frekvencija uzorkovanja 1/s 1 ... 9600

Napajanje pretvarača mA 0.25

Mjerno vratilo - ulazno

Hottinger Baldwin Messtechnik, T1

Klasa točnosti 0.2

Nazivni moment 20 Nm

Nazivna osjetljivost 1.5 mV/V

Tolerancije osjetljivosti $\leq \pm 0.1$ **Mjerno vratilo - izlazno**

Hottinger Baldwin Messtechnik, T2

Klasa točnosti 0.5

Nazivni moment 500 Nm

Nazivna osjetljivost 1.5 mV/V

Tolerancije osjetljivosti $\leq \pm 0.2$ **Temperaturni osjetnik**

INS STD-5

Ostala oprema**Digitalni fotografski aparat Olympus C-5050Z**Senzor: CCD, $5,26 \cdot 10^6$ piksela

Formati zapisa: JPEG, TIFF, RAW

Leće: Olympus multivarijabilne leće

Optičko uvećanje: 3x

Područje primjene (udaljenost):

- normalno, od 0,8 m i više
- uvećano, od 0,2 do 0,8 m
- jako uvećano, do 0,03 m

Brojač okretaja

SMITHS M

Mjerno područje 0-400, 0-2000, 0-10000 o/min

Točnost $\pm 0,1\%$ **Komparator**

Mitutoyo 513-224E

Mjerno područje 0,01-0,5 mm

13

LITERATURA

-
- [1] Wilkesmann, H.: Berechnung von Schneckengetrieben mit unterschiedlichen Zahnprofilformen; Dissertation, TU München, 1974.
 - [2] Huber, G.: Untersuchungen über Flankentragfähigkeit und Wirkungsgrad von Zylinderschneckengetrieben (Evolventenschnecken), Dissertation, TU München, 1978.
 - [3] Opalić, M.: Istraživanje utjecaja materijala na opteretivost pužnih prijenosnika, Magistarski rad, FSB Zagreb, 1980.
 - [4] Opalić, M.: Prilog istraživanju opteretivosti bokova pužnih kola pužnih prijenosnika, Doktorska disertacija, FSB Zagreb, 1984.
 - [5] Oberšmit, E.: Ozubljenja i zupčanici, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1987.
 - [6] DIN 3996, Ausgabe:1998-09: Tragfähigkeitsberechnung von Zylinder-Schneckengetrieben mit Achsenwinkel = 90° , DIN, 1998.
 - [7] ISO/DIS 14521.2: Gears – Calculation of load capacity of wormgears, ISO, Geneva, 2006.
 - [8] ISO/TR 10828:1997: Worm gears - Geometry of worm profiles, ISO, Geneva, 1997.
 - [9] Burdick, R.: Manufacturing Single-Envelope Worm Gears, Gear Solutions, April 2003.
 - [10] Gear handbook: the design, manufacture, and application of gears, ed. D. W. Dudley, McGraw-Hill Book Co., Inc., 1962.
 - [11] Munro, R.G.: Measuring the kinematic accuracy of worm gears, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C, Vol 213, 1999, p381-388.
 - [12] Snidle, R. W., Evans, H. P., Alanou, M. P.: Gears: elastohydrodynamic lubrication and durability, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C

- Mechanical engineering science incorporating the Journal of mechanical engineering science, v 214 Part C n C1 (1999), p039-050
- [13] Sharif, K.J., Evans, H.P., Snidle, R.W.: Prediction of the wear pattern in worm gears, *Wear* 261 (2006), p666-673
 - [14] Hertz, H.: *Gesammelte Werke*, Tom 1, Leipzig, 1895., 155.
 - [15] Žeželj, D.: Istraživanje nosivosti klizno-valjnih parova, Magistarski rad, FSB Zagreb, 2002.
 - [16] Ivušić, V.: *Tribologija*, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2002.
 - [17] Olver, A. V.: Gear lubrication – a review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of engineering tribology*, Vol 216, No J5 – 2002, p255-267
 - [18] Reynolds, O.: On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. B. Tower's Experiments, Including an Experimental Determinatio of the Viscosity of olive oil, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol.117, London, 1886., 157-234.
 - [19] ISO 7902-1: Hydrodynamic Plain Journal Bearings under Steady-state Conditions – Circular Cylindrical Bearings – Part 1: Calculation procedure, ISO, Geneva, 1998.
 - [20] Dowson, D., Higginson, G.R.: A Numerical Solution to the Elastohydrodynamic Problem, *International Journal Mechanical Engineering Science*, 1, 1959., 1-6.
 - [21] Dowson, D., Higginson, G.R.: *Elastohydrodynamic Lubrication*, Pergamon Press, Oxford, 1966.
 - [22] Blok, H.: *The Surface Temperatures under Extreme Pressure Lubricating Conditions*, Laboratorium der Royal Dutch Shell, 1937.
 - [23] Sadeghi, F., Dow, T.A.: Thermal Effects in Rolling/Sliding Contacts, Part 2: Analysis of Thermal Effects in Fluid Film, *Transactions of ASME, Journal of Tribology*, Vol. 109, 3, 1987., 512-518.
 - [24] Lansdown, A.R.: High-Temperature Lubrication, *Proc. Inst. Mech. Engrs., Journal of Mechanical Engineering Science, Part C*, Vol.204, 1990., 279-291.
 - [25] Muminović, A.: Istraživanje primjenjivosti termoelastohidrodinamičkog podmazivanja kod pužnih prenosnika, Doktorski rad, Mašinski fakultet, Sarajevo, 2003.
 - [26] Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W.: *Engineering Tribology*, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, 2001.

-
- [27] Johnson, K.L., Greenwood, J.A., Poon, S.Y.: A Simple Theory of Asperity Contact in Elastohydrodynamic Lubrication, *Wear*, Vol. 19, 1972, pp. 91-108.
- [28] Tallian, T.E.: On Competing Failure Modes in Rolling Contact, *ASLE Transactions*, Vol. 10, 1967, pp. 418-439.
- [29] Sayles, R.S., deSilva, G.M.S., Leather, J.A., Anderson, J.C., Macpherson, P.B.: Elastic Conformity in Hertzian Contacts, *Tribology International*, Vol. 14, 1981, pp. 315-322.
- [30] Guangteng, G., Cann, P. M., Olver, A. V., Spikes, H. A.: An experimental study of film thickness between rough surfaces in EHD contacts, *Tribology International* 33 (2000), p183-189
- [31] Workel, M. F., Dowson, D., Ehret, P., Taylor, C. M.: The influence of mean contact pressure on the friction coefficient of a traction fluid at high pressure, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Mechanical engineering science incorporating the Journal of mechanical engineering science*, v 214 Part C n C2; 2000, p309-312
- [32] Rakamarić, P.: Utjecaj maziva na trošenje materijala pužnih kola, *Doktorska disertacija*, FSB Zagreb, 1995.
- [33] Blencoe, K. A., Williams, J. A.: Friction of sliding surfaces carrying boundary films, *Wear* 203-204 (1997), p722-729
- [34] Hsu, Stephen M.: Molecular basis of lubrication, *Tribology International* 37 (2004), p553-559
- [35] Höhn, B.-R., Michaelis, K.: Influence of oil temperature on gear failures, *Tribology International* 37 (2004), p103-109
- [36] ISO 6743-6:1990: Lubricants, industrial oils and related products (class L) - Classification - Part 6: Family C (Gears), ISO, Geneva, 1990.
- [37] Hölgund, E.: Influence of lubricant properties on elastohydrodynamic lubrication, *Wear* 232 (1999), p176-184
- [38] Roelands, C.J.A.: Correlation Aspects of Viscosity - Temperature - Pressure Relationship of Lubrication Oils, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1966.
- [39] Bair, S., Jarzynski, J., Winer, W. O.: The temperature, pressure and time dependence of lubricant viscosity, *Tribology International* 34 (2001), p461-468

-
- [40] Kato, K.: Classification of wear mechanisms/models, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J Journal of engineering tribology, Vol 216, No J6 – 2002, p349-355
- [41] Kljajin, M.: Istraživanje graničnih područja nosivosti zupčanog para, Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 1995.
- [42] Glodež, S., Ren, Z., Flašker, J.: Surface fatigue of gear teeth flanks, Computers and Structures 73 (1999) p475-483
- [43] Aslantaş, K., Taşgetiren, S.: A study of spur gear pitting formation and life prediction, Wear 257 (2004), p1167-1175
- [44] Ding, Y., Rieger, N. F.: Spalling formation mechanism for gears, Wear 254 (2003), p1307-1317
- [45] Ren, Z., Glodez, S., Fajdiga, G., Ulbin, M.: Surface initiated crack growth simulation in moving lubricated contact, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 38 (2002), p141-149
- [46] Antoine, F., Besson, J-M: Simplified modellization of gear micropitting, Proceeding of the Institution of Mech. Engrs., Vol. 216, Part G, 2002., 291-302.
- [47] Ang, T.: Digital Photographer's Handbook, A Dorling Kinderslay book, 2002.
- [48] Fraser, B.: Understanding Digital Raw Capture, Adobe Systems Incorporated, 2004., www.adobe.com
- [49] Wheatley, J. Y.: The Polar Planimeter and Its Use in Engineering Calculations Together With Tables, Diagrams and Factors, Keuffel & Esser Co., New York, 1903.
- [50] Eschmann, P., Hasbargen, L., Weigand, K.: Ball and Roller Bearings, Theory, Design and Application, John Willey&Sons Ltd., 1985.

Dragan Žeželj rođen je 27. studenog 1965. godine u Varaždinu. Srednju matematičku školu je završio u Zagrebu. Dodiplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje upisao je 1985. godine u Zagrebu, te diplomirao 1991.g. na usmjeranju "Energetika", odjel "Grijanje i klimatizacija".

Od 1992. do 1995. godine zaposlen je u poduzeću Grijanje, Zagreb, te radi na poslovima samostalnog konstruktora termoenergetske opreme. Tijekom zimskog semestra 1992. godine sudjeluje u izvođenju vježbi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje iz kolegija Primjena računala kao honorarni asistent. Od 1995. do 1998 godine radi u poduzeću Larasystem d.o.o., Zagreb, na poslovima voditelja pojedinačnih radilišta.

Od kraja 1998. godine zaposlen je na Katedri za elemente strojeva i konstrukcija Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u svojstvu mlađeg asistenta, a od 2003. godine asistenta. Tijekom dosadašnjeg rada na fakultetu aktivno sudjeluje u nastavi iz sljedećih kolegija: Tehničko crtanje i dokumentacija, Računalna i inženjerska grafika, Elementi konstrukcija I, II i III. U svojstvu honorarnog asistenta izvodio je vježbe iz kolegija Osnove konstrukcija pri Studiju dizajna (Arhitektonski fakultet u Zagrebu), Tehnička dokumentacija pri Tehničkom veleučilištu u Zagrebu te Tehnička dokumentacija pri Studiju fizike i politehnike (Prirodoslovno-matematički fakultet u Zagrebu). U lipnju 2006. godine je izabran u naslovno nastavno zvanje predavača u području tehničkih znanosti, polje strojarstvo. Od 2002. obavlja poslove voditelja industrijske prakse za smjer Strojarske konstrukcije.

Poslije diplomski studij završio je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Zagreb. Kao magistrant kod mentora prof. dr. sc. Milana Opalića, 19. studenog 2002. godine obranio je magistarski rad pod naslovom "Istraživanje nosivosti klizno-valjnih parova", područje: tehničkih znanosti, polje strojarstvo te stekao akademski stupanj magistra znanosti.

Znanstvenim radom se bavi u okviru projekta br. 012009 "Istraživanje temeljnih elemenata strojarskih sustava" Ministarstva znanosti, obrazovanja i športa RH. Suradnik je na tehnologijsko istraživačko-razvojnom projektu TP-04/0120-41 "Razvoj laboratorija za testiranje sjedišta vozila".

Kao autor ili koautor objavio je 5 znanstvenih i 8 stručnih radova u Hrvatskoj i inozemstvu te 4 priručnika ili internih skripata. Od 2003. godine do preustroja Državnog zavoda za normizaciju i mjeriteljstvo (2005) bio je član tehničkog odbora DZNM/TO 537, Tehnički crteži, dimenzijske i geometrijske specifikacije, opis proizvoda i odgovarajuća dokumentacija, a poslije član istog odbora pri Hrvatskom zavodu za normizaciju. Član je Hrvatskog društva za elemente strojeva i konstrukcija. Govori i piše engleskim, a pasivno se služi njemačkim jezikom.

Oženjen je i otac dvoje djece.

Dragan Žeželj was born in Varaždin on November 27th, 1965. He finished a high school (mathematical gymnasia) in Zagreb and in 1991 graduated from the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, in the field of heating and ventilation.

From 1992 to 1998 he was employed in two companies as a designer of thermo-energetic equipment and a work-site manager.

In the fall of 1998 he became a younger assistant at the Department of Machine Elements and Design at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture and participated in the teaching of the following courses: Technical drawings and documentation, Computer and engineering graphics, and Machine elements I, II and III. He also participated in the teaching of the course Design basics at the Faculty of Architecture, School of Design, and of the course Technical documentation at the Polytechnic school of Zagreb and at the Faculty of Science, School of Physics and Polytechnic. Since 2002 he has been the head of the course Industrial praxis, for the branch of Mechanical design. In July of 2006 he was promoted to the position of lecturer in the area of technical science, field of mechanical engineering.

Under the mentorship of Professor Milan Opalić, PhD, he completed his post-graduate studies at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture on November 19th 2002 with the thesis “Research of load capacity of sliding-rolling pairs” and acquired his MSc degree in the area of technical science, field of mechanical engineering.

He is engaged in science activities on the project No. 012009 entitled “Research of basic machine element systems” funded by the Croatian Ministry of Science, Education and Sports. Also, he is an associate member on the technological project Tp-04/0120-41 “Development of laboratory for testing car seats”.

As the author or co-author he has published 5 scientific papers and 8 technical reports in Croatia and abroad as well as 4 scripts and handbooks. He is a member of the Croatian Society for Machine Elements and Design and a member of Technical committee TO537 at the Croatian Standards Institute. He has a good command of spoken and written English and can use German.

He is married and a father of two children.